

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV ENERGETICKÝ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

VIZUALIZACE PROUDU Z VĚTRACÍ VYÚSTKY
PRO PŘÍSTROJOVOU DESKU OSOBNÍHO VOZU
VISUALIZATION OF AIR JET FROM VENTILATION OUTLET OF A PASSENGER CAR DASHBOARD

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADEK BEČICA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK LÍZAL, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Radek Bečica

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Technika prostředí (2301T024)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vizualizace proudu z větrací vyústky pro přístrojovou desku osobního vozu

v anglickém jazyce:

Visualization of air jet from ventilation outlet of a passenger car dashboard

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předpokladem správné funkce ventilačního systému v kabinách dopravních prostředků je optimalizovaná konstrukce větracích vyústek. Pro posuzování proudění vzduchu z vyústek se často používají vizualizační metody. Pomocí tzv. kouřové metody zviditelněný proud vzduchu z vyústky je osvětlen vhodným světelným zdrojem a jeho obraz je zaznamenán pomocí kamery nebo fotoaparátu. Obraz proudu je pak dále zpracován a analyzován. Získané poznatky slouží k posouzení funkčnosti vyústky a umožní její další optimalizaci. Tato práce má za úkol připravit zkušební zařízení, optimalizovat vizualizační aparaturu a provést vizualizaci proudu s analýzou obrazu.

Cíle diplomové práce:

- Revize uspořádání stávajícího zařízení pro zkoušení a sestavení měřicí aparatury
- Výběr snímače pro měření průtoku vzduchu před vyústkou
- Optimalizace nastavení vizualizačního řetězce pro aplikaci na vyústce (generátor mlhy + světelná rovina + záznamová kamera)
- Vizualizace proudu z větrací vyústky pro definované režimy provozu a analýza obrazu s ohledem na hodnocení funkce vyústky

Seznam odborné literatury:

Vedoucí diplomové práce: Ing. František Lízal, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 26.11.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je experimentálně analyzovat proud vzduchu z pravé vyústky automobilu kouřovou metodou a náležitě jej popsat. Průtok vyústkou byl zvolen $30 \text{ m}^3/\text{h}$ a to z důvodu požadavku od firmy Škoda Auto s.r.o. při měření podobné vyústky v minulých letech. Pro předchozí měření vznikl první typ experimentální tratě, který byl rozebrán a nahrazen novým modernizovaným typem měřicí tratě tak, aby bylo možno tuto trať používat pro budoucí aplikace a řešení podobné problematiky. Vizualizace byla provedena pomocí kouře a laserové světelné roviny. Záznam byl proveden fotoaparátem a to vždy pro pět definovaných nastavení vyústky, jak při proudění do volného prostoru, tak při proudění kolem stěny, kterou byly simulovány dveře automobilu. Výsledky byly zpracovány v počítači a jsou prezentovány jak grafickou formou, tak pomocí tabulek. Vyhodnocené úhly jsou transformovány do souřadného systému automobilu a následně je vyhodnocena funkčnost vyústky pro distribuci vzduchu v interiéru automobilu.

ABSTRACT

Goal of this master's thesis is to experimentally analyse air jet from ventilation outlet of a passenger car dashboard using smoke visualization and to describe this air jet. Air flow was set at $30 \text{ m}^3/\text{h}$ according to requirements from Škoda Auto s.r.o. from previous experiments on a similar ventilation outlet. First type of measuring rig which was developed for previous experiments was disassembled and replaced with a new modern measuring rig which is supposed to be used for next visualizations and experiments. Visualization was performed using smoke method and laser light plane. Air jet was photographed for five defined ventilation outlet adjustments and that for a jet to free space and for a jet flowing along a wall. The wall represented a front left door of a car. Results were processed by computer and presented as pictures and tables. Resulting angles were transformed to the main coordinate system of a car. Ventilation outlet functionality with respect to the air distribution in a car was evaluated afterwards.

KLÍČOVÁ SLOVA

měřicí (experimentální) trať, vyústka, vizualizace, kouřová metoda, proudění, clona, průtok vzduchu, mezní vertikální nastavení, sklon proudu, vybočení proudu, okraje proudu, boční pohled, spodní (horní) pohled

KEYWORDS

measuring (experimental) rig, ventilation outlet, visualization, smoke method, convection, orifice, air flow, vertical direction cut off, angle of inclination, yaw angle, flow borders, side view, upper (lower) view

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BEČICA, R. Vizualizace proudu z větrací vyústky pro přístrojovou desku osobního vozu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Lízal, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem celou tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Františka Lízala, Ph.D.

Uvedl jsem všechny literární prameny, odborné publikace a adresy internetových stránek, ze kterých jsem čerpal.

.....
Bc. Radek Bečica
23. 5. 2013

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Františku Lízalovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady při vypracování této diplomové práce. Dále Ing. Janu Jedelskému, Ph.D. za rady ohledně měření veličin a používání potřebného vybavení. Dále Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za rady a pomoc při tvorbě 3D výtisků. V neposlední řadě také Petru Caletkovi za praktickou výpomoc při sestavení tratě a samotném měření.

Při realizaci této diplomové práce bylo využito přístrojové vybavení pořízené v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), reg. č.: CZ. 1.05/2.1.00/01.0002, id. kód: ED0002/01/01, financovaného z Operačního programu výzkum a vývoj pro inovace, který je spolufinancovaný ERDF (European Regional Development Fund).

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 TEORETICKÝ ZÁKLAD	11
1.1 Proudění tekutin.....	11
1.2 Měřený objekt.....	22
1.3 Vyústka	23
2 MĚŘICÍ TRATĚ	24
2.1 Umístění měřicí trati v laboratoři.....	25
2.2 Schéma a popis měřicí tratě.....	26
3 MĚŘENÍ	35
3.1 Měřené veličiny	35
3.2 Sledované veličiny.....	37
3.3 Postup měření.....	38
3.4 Mezní vertikální nastavení	39
4 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	43
4.1 Pořízení a úprava fotografií.....	43
4.2 Určení souřadnic okrajů proudu programem Delphi.....	45
4.3 Určování okrajových přímk a os proudu pomocí MathCadu	46
4.4 Microsoft Excel	46
4.5 Souřadné systémy	47
4.6 Nejistoty měření	51
5 VÝSLEDKY VIZUALIZACE	52
5.1 Volný prostor – Boční pohled	52
5.2 Volný prostor – Spodní pohled	57
5.3 Omezený prostor – Boční pohled.....	62
5.4 Omezený prostor – Spodní pohled.....	67
6 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	72
ZÁVĚR.....	75
POUŽITÉ ZDROJE.....	76
POUŽITÉ ZNAKY	78

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá vizualizací proudu z větrací vyústky přístrojové desky osobního vozu a následným zpracováním dosažených výsledků. Měření proudění může pomoci při vývoji automobilů, konkrétně aplikované výsledky usnadní dosažení vhodného mikroklimatu ve vnitřních prostorech vozu při co nejnižších energetických nárocích. Nevhodné podmínky, jako třeba teplotní nerovnováha anebo nevhodné profily proudění mají velký vliv na komfort cestujících.

Celé měření bylo prováděno pro boční vyústku modelu vozu Škoda Octavia II na straně spolujezdce. Prvním úkolem práce byla revize uspořádání stávajícího zařízení pro měření, a následné sestavení měřicí tratě. V minulosti bylo již toto téma řešeno, ale dosavadní měřicí trať byla vyhodnocena již jako nevyhovující a to z důvodu nyní možnosti využití velkého prostoru pro novou měřicí trať a použití nových měřicích přístrojů. Nová měřicí trať byla navržena a sestavena s ohledem na možnosti využití této měřicí tratě pro budoucí řešení podobné problematiky.

Následným úkolem bylo navržení vhodného měřicího postupu. To znamenalo seřadit a zaregulovat měřicí trať na definované hodnoty průtoku, následně nastavit světelnou rovinu, přizpůsobit záznamové zařízení a vytvořit velký počet obrazových záznamů.

Samotné měření probíhalo ve dvou fázích. První z nich bylo měření proudu vystupujícího do volného prostředí. Druhou fází bylo měření proudu do prostoru částečně omezeného, simulujícího prostředí automobilu. Reálná simulace bočních dveří může mít za následek změnu proudění.

Výsledkem měření byly záznamy proudění pro jednotlivá nastavení vyústky a tyto výsledky byly použity pro analýzu v počítačovém softwaru. Díky konečným výsledkům byla hodnocena funkčnost vyústky ve všech režimech nastavení, pro které bylo provedeno měření.

Původní a nové výsledky jsou uvedeny v závěru práce společně s vyhodnocením výsledků.

1 TEORETICKÝ ZÁKLAD

K určení vhodného vnitřního prostředí interiéru automobilů se používá řada kritérií. Je vhodné sledovat zejména teplotní pole interiéru automobilu, rychlostní pole a intenzitu výměny venkovního vzduchu [11].

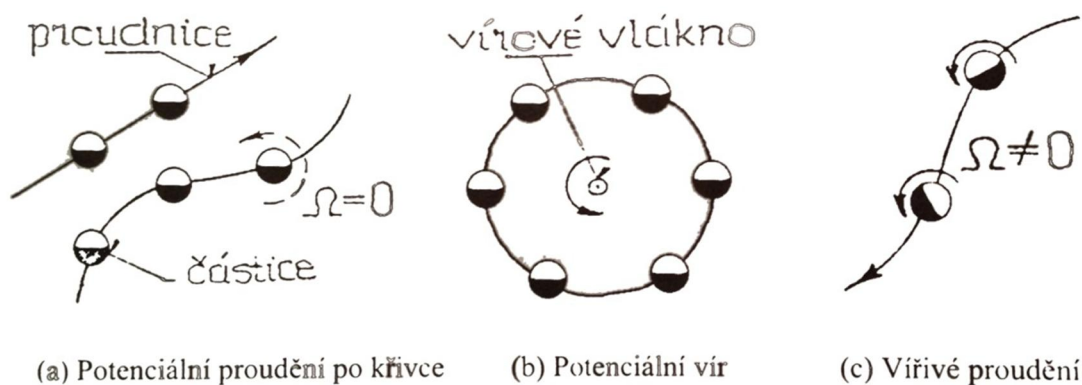
Na základě těchto kritérií se upravuje počet a velikost výústek. Nutno také zabezpečit potřebnou směrovatelnost proudu z vyústky lamelami a dostatečné množství vzduchu mířícího do interiéru. Upravený vzduch má za úkol redukovat tepelné ztráty či zisky a navíc zabezpečit kvalitní vnitřní podmínky pro cestující.

Pro určení proudového pole je nutno provést **vizualizaci** kouřovou metodou, která poskytne obrazy **proudění** vzduchu z měřené vyústky. Výsledkem je **sklon a vybočení osy proudu vzduchu a jeho okrajů** v souřadném systému automobilu a také určení **mezního vertikálního směřování** proudu z vyústky. Tyto pojmy budou dále vysvětleny v následujících kapitolách.

1.1 Proudění tekutin

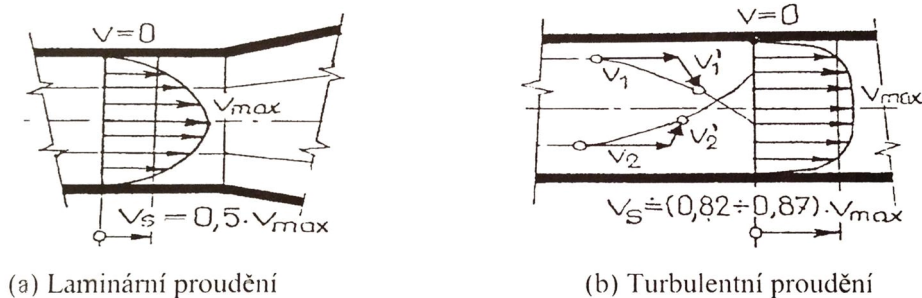
Proudění je neuspořádaný pohyb tekutiny, při kterém se její částice posouvají převážně v jednom směru a to ve směru proudění. Pohyb tekutin je výrazně složitější oproti pohybu pevných látek díky tomu, že jednotlivé částice v tekutinách mohou měnit vzájemnou polohu. Tekutinou je myšlena jakákoli kapalná či plynná látka. Z fyzikálního hlediska můžeme proudění dále definovat a popisovat [6, 9].

Při proudění ideální tekutiny (Obr. 1) dochází k **potenciálnímu (nevířivému)** proudění, anebo **vířivému** proudění. Při potenciálním nevířivém proudění se pohybují částice tekutiny po přímočarých či zakřivených drahách (proudnicích) tak, že se samotné částice pro pozorovatele neotáčejí kolem své osy při pohybu po jakékoli zakřivené dráze. Naopak je tomu u vířivého proudění, kdy se částice při pohybu navíc otáčejí kolem vlastní osy [13].



Obr. 1 - Proudění ideální tekutiny [13]

Při proudění reálné tekutiny (Obr. 2), které mají vnitřní tření mezi částicemi a jsou obecně stlačitelné, rozlišujeme proudění **laminární** a **turbulentní**. Laminární proudění je takové proudění, kdy se částice pohybují po vrstvách a nedochází přitom k jejich přemísťování napříč průřezem. Při jednorozměrném laminárním proudění je rychlostní profil ve tvaru rotačního paraboloidu. Při turbulentním proudění mají částice kromě své posuvné rychlosti v také flukтуаční (turbulentní) složku této rychlosti v' , kterou se částice přemísťují po průřezu. Tvar rychlostního profilu při turbulentním proudění se blíží rychlostnímu profilu při proudění ideální kapaliny [13].



Obr. 2 - Proudění reálné tekutiny [13]

Jelikož může být každá částice v proudící tekutině popsána charakteristickou veličinou (tlak, teplota, rychlost aj.), jejichž velikosti jsou závislé na čase, rozlišujeme proudění **stacionární** a **nestacionární**. Stacionární proudění neboli ustálené proudění je takové proudění, při kterém je rychlost částic stálá a nemění se v čase. Nestacionární proudění je na čase závislé a částice mohou měnit svou rychlost [13].

Proudnice (proudová čára) je trajektorii každé částice v tekutině při jejím pohybu. Okamžitá rychlost částice v libovolném bodě je tečná k proudnici, přičemž částice má v daném okamžiku pouze jednu proudnici. Při laminárním proudění jsou proudnice rovnoběžné. Při turbulentním proudění se proudnice navzájem protínají [6].

Obrazy proudění

Při výstupu proudu z vyústek považujeme toto proudění za turbulentní. Při turbulentním proudění jsou neostře okraje proudu z důvodu strhávání částic proudících do prostoru a také naopak z důvodu strhávání částic okolního vzduchu do proudu. Proud tímto vyvolává malé tlakové rozdíly. Vzniklé tlakové síly však výrazně deformují proudy z vyústek, které se šíří kolem těles. Tyto síly způsobují vzájemnou interakci více proudů anebo přilnutí proudu ke stěnám (Coandův jev).

Dle podobnosti ke geometrickým útvarům můžeme rozdělit vystupující proud z vyústek na proud **kruhový**, **plochý** a **radiální**. Jelikož se proudy po určité vzdálenosti mění na kruhové, můžeme proudy vystupující z obdélníkových a štěrbinových vyústek považovat za kruhové proudy. Radiální proudy vznikají při výtoku z anemostatu.

Obraz proudění dává grafickou představu o charakteru proudění z hlediska rychlostí, průtoků anebo směrů proudění.

Dosah proudu x_L udává vzdálenost od vyústky, kde poklesne maximální rychlost proudu na určitou hodnotu. Obvykle se určuje jako $w=0,5 \cdot w_{max}$, kde w_{max} je maximální rychlost proudění v ose.

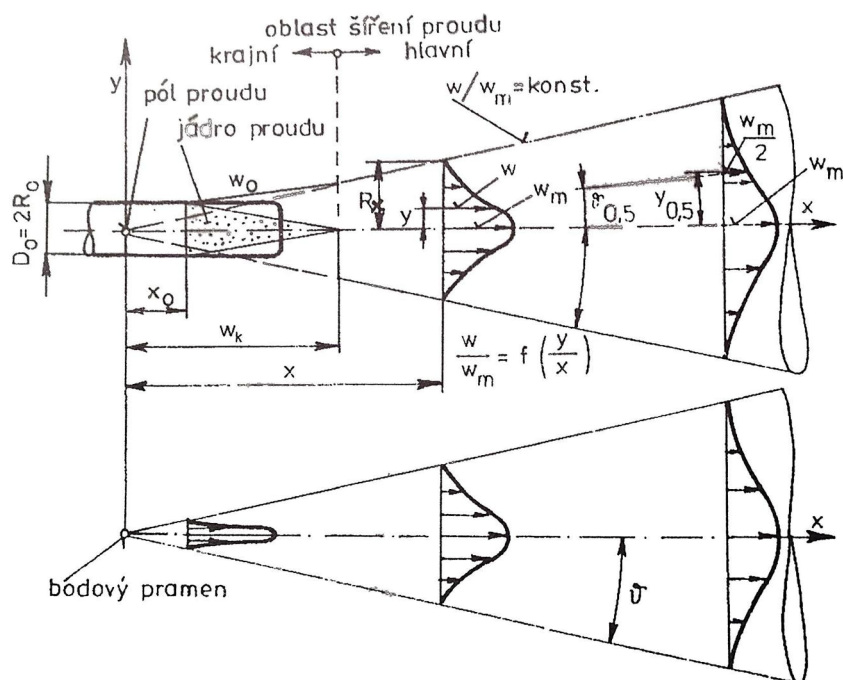
Proud **primární** je tvořen přiváděným vzduchem s částí okolního strženého vzduchu a šíří se setrvačnými silami. Proud **sekundární** je proud vyvolaný primárním proudem.

Proud může být deklarován jako proud **volný**, který není ovlivňován stěnami místnosti, proud **omezený**, který je brzděn zpětnými proudy kolem primárního proudu a proud **zatopený**, což je proud šířící se v klidném prostředí stejných fyzikálních vlastností.

Proud **přilnutý** je proud přitisknutý ke stěně, kolem které se šíří. Proud **slabě neizotermní** je proud vzduchu o jiné teplotě, než je v místnosti, přičemž jeho vztahové síly jsou vůči setrvačným silám zanedbatelné. Proud neizotermní má tyto síly souměřitelné a proud **konvektivní** vzniká samovolně při přívodu či odvodu tepla díky vztahovým (gravitačním) silám [4, 14].

Pro proudění z měřené vyústky, která je čtyřhranná, se předpokládá šíření proudu jako z kruhové vyústky. Laboratoř byla dostatečně velká, její stěny neovlivňovaly proudění a zpětné proudy byly zanedbatelné, proto se bude proud vzduchu, vystupující z měřené vyústky, nazývat za proud volný pro první fázi měření. Pro druhou fázi je proud ovlivněn vloženou stěnou a bude se tedy nazývat za proud přilnutý. V celé laboratoři bylo také ustálené prostředí se stejnými fyzikálními vlastnostmi, proto se proud dá nazývat za zatopený. Teplotní rozdíly v laboratoři byly zanedbatelné, nebude se počítat se vztahovými silami, proto je proud nazýván také za izotermní.

Na výstupu se předpokládá turbulentní proudění, které bude strhávat okolní částice vzduchu do proudu a předávat jim svou hybnost. Tímto bude docházet k neustálému zvyšování množství proudícího vzduchu, přičemž rychlost proudu bude klesat. Proudění se tedy bude šířit jako volný proud z kruhové vyústky (Obr. 3) a bude se směrem od vyústky rozšiřovat [4, 14].



Obr. 3 - Schéma volného proudu šířícího se z kruhové vyústky [4]

Jak je na (Obr. 3) vidět, hranice proudu jsou tvořeny dvěma na sebe navazujícími kuželovitými plochami. Oblast proudu se rozděluje na **krajní** a **hlavní** oblast šíření proudu. V krajní oblasti, kde se nachází jádro proudu je rychlost v ose w_0 rovna rychlosti výtokové w_m . V hlavní oblasti se poté vytváří ustálený rychlostní profil volného proudu a rychlost může být vyjádřena dle rovnice (1.1)

$$\frac{w_m}{w_0} = K_A \cdot \frac{\sqrt{S_0}}{x} \quad (1.1)$$

kde:

w_m – výtoková rychlost [m/s]

w_0 – rychlost v ose proudu [m/s]

K_A – konstanta vyústky (charakterizuje pokles rychlosti) [-]

S_0 – průřez vyústky [m]

x – vzdálenost od vyústky ve směru osy proudu [m],

a navíc se proud šíří na obě strany, přičemž okraje proudu svírají úhel 2ϑ .

Podélnou složku rychlosti v kruhovém proudu vyjadřuje Schlichtingova rovnice (1.2), dávající do rovnosti rychlosti proudění s polohou v proudu

$$\frac{w}{w_m} = \left[1 - \left(\frac{y}{R_x} \right)^{1,5} \right]^2 \quad (1.2)$$

kde:

w – okamžitá rychlost [m/s]

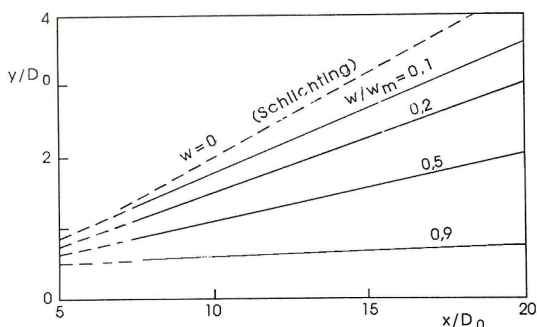
w_m – výtoková rychlost [m/s]

y – kolmá vzdálenost od vyústky [m]

R_x – poloměr proudu [m] [4, 14].

Okraje proudu

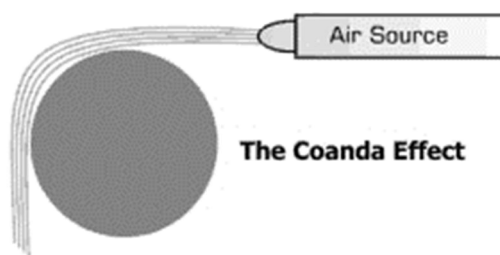
Zjištění hranic proudu je složité díky častému střídání turbulentního proudění s potenciálním prouděním částic vně proudu. Hranice proudu jsou přímkové a jsou definovány poměrem okamžité rychlosti w a osové rychlosti w_0 , přičemž je tento poměr konstantní a pro ideální případy se blíží nule. Hranice volného proudu ve vzdálenosti x od vyústky vyjádřené poměrem w/w_0 jsou vidět na (Obr. 4) [4, 14].



Obr. 4 - Hranice volného proudu při vyjádření poměru rychlostí w/w_0 [4]

Přilnutý proud

Přilnutí proudu ke stěně, kolem které vzduch proudí, popisuje Coandův jev. V důsledku tlakových poměrů vyvozených prouděním dochází ke strhávání okolního vzduchu do proudu. Při volném proudění je okolní vzduch strháván do proudu, avšak proudí-li vzduch kolem plochy, nejsou zde volné částice vzduchu, které by vstupovaly do tohoto proudu, a proto vlivem tlakových sil vyvolaných proudícím vzduchem dochází k přilnutí proudu směrem k obtékanému tělesu (Obr. 5). Vznik Coandova jevu ovlivňuje charakter proudění (intenzita turbulence, rychlost proudění, geometrie obtékaného povrchu a fyzikální vlastnosti tekutiny). Při konvexním zakřivení povrchu ve směru toku, jsou tlakové síly mezi proudem tekutiny a povrchem vyšší než u zakřivení nekonvexního [15].



Obr. 5 - Coandův jev [15]

Tento jev by se měl objevit při měření proudění v druhé fázi. Podélně vložená plocha k vyústce, simulující dveře automobilu, by měla mít vliv na vybočení úhlu proudu směrem k této ploše. Tuto domněnku je třeba potvrdit experimentem.

Vizualizace proudění

Vizualizací proudění se rozumí vyšetřování proudění tekutin a následné získávání optického záznamu – obrazu vlastností proudového pole. Tyto metody pomáhají dále vyjasňovat fyzikální podstatu při určitých případech proudění a obvykle poskytují názornou informaci o celém sledovaném objektu [3, 5].

Vizualizace proudění nachází uplatnění například v oblasti proudění tekutin, oblasti přenosu tepla konvekcí, oblasti techniky prostředí a v mnoha dalších oblastech. Vizualizace proudění se dělí do dvou hlavních skupin – **bezdotykové** a **dotykové** metody.

Bezdotykové metody neovlivňují proudění jako takové. Bezdotykovými metodami jsou zpravidla označovány různé optické metody. Naproti tomu dotykové metody vyžadují zavádění cizí látky, které jsou v kontaktu se sledovaným objektem a tím jej částečně ovlivňují. Dotykovými metodami jsou označovány vizualizační metody zavádění látek do tekutiny a sledování obtékaných těles.

Vyhodnocování vizualizačních metod může probíhat v reálném čase nebo dodatečně díky fotografickým, filmovým či počítačovým záznamům. Výsledkem vizualizace jsou plošné nebo prostorové záznamy pole sledované veličiny [2, 3].

Bezdotykové metody nevyžadují zavádění speciálních látek, které by byly v kontaktu se sledovaným objektem, ale nositelem informace o stavu sledovaného objektu je světelné či jiné zařízení, které se mění v důsledku změny sledovaného objektu [2].

Mezi bezdotykové metody se řadí:

- a) Stínové metody - založeny na principu zakřívování trajektorií světelných paprsků vlivem průchodu nehomogenním transparentním prostředím (tepelná mezní vrstva okolo zahřívané plochy).
- b) Clonkové (šlírové) metody - založeny na principu zakřívování trajektorií světelných paprsků vlivem průchodu nehomogenním transparentním prostředím (tepelná mezní vrstva okolo zahřívané plochy) a následnou filtrací paprsků šířících se vybraným směrem pomocí čočky a clony.
- c) Interferometrie – nejpřesnější optická metoda určena pro přímé měření rozložení indexu lomu v tekutinách.
- d) Holografie – využívá interference světla pro záznam trojrozměrných obrazů použitím koherentních světelných zdrojů. Pomocí holografie se zaznamenávají prostorové objekty odrážející světlo, ale také prostorové transparentní objekty [3].

Dotykové metody vyžadují speciální cizí látky, které jsou v neustálém kontaktu se sledovaným objektem a z jeho chování či změny stavu se usuzují fyzikální veličiny sledovaného objektu. Důležitou podmínkou při zavádění cizích látek je, aby zaváděná látka kopírovala co nejlépe proudnice základní tekutiny a byla co nejméně ovlivňována okolními vlivy (gravitační pole, setrvačné síly) [2].

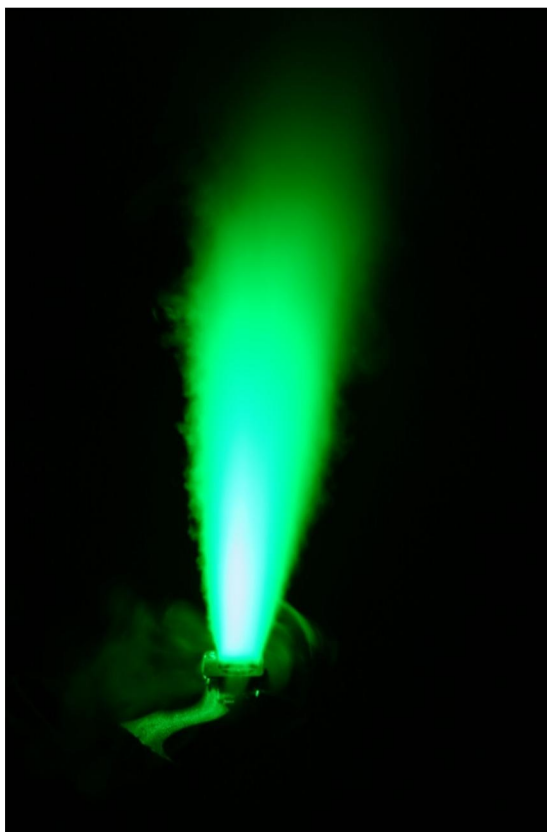
Mezi dotykové metody se řadí:

- a) Zavádění částic do tekutiny – tvoří při záznamu proudění nesouvislé trajektorie a tím se zviditelňuje proudění jak kapalin, tak plynů. Příkladem jsou mýdlové bublinky v plynu, či bublinky plynu v kapalině. Při měření dvoufázového proudění nemusíme další cizí látku zavádět, stačí použít jednu z fází k záznamu.
- b) Zavádění látek tvořící souvislá vlákna – zviditelňujeme proudění kapalin i plynů. Pro zviditelnění proudění kapalin se používají různá barviva zaváděna tenkými trubičkami, bublinky o jiných vlastnostech než kapalina vzniklá při elektrolýze nebo barvy vzniklé chemickou reakcí účinkem světla. Pro zviditelnění plynů se používají dlouhá a tenká vlákna plamene nebo se zavádí kouř či mlha do sledovaného prostoru. Tato metoda se hodí pro zkoumání místní turbulence a aplikuje se také pro zjišťování hranic proudu.
- c) Indikátory směru proudu - jsou tenké niťovité sondy s roztřepeným koncem udávající směr proudění. Stejně tak může být použit plamen svíčky, páry či kouře z různých vyvíječů.
- d) Metoda PIV – zaváděním částic do tekutiny a následným zaznamenáváním pomocí kamery a vyhodnocováním pomocí počítače se určuje změna polohy částic, dostáváme vektorovou mapu rychlostí proudového pole [3].

Při řešení této diplomové práce bylo použito dotykové metody pro zviditelnění proudu vzduchu z výústky kouřovou metodou. Kouř z generátoru kouře se mísil s nasávaným vzduchem a vstupoval do měřicí trati. Na druhé straně vystupoval skrze výústku, kde byl měřicí prostor, do něhož proudil kouř. Pro měření bylo zapotřebí kontinuálního přívodu kouře tak, aby byl fotoaparát schopen zaznamenat proudové pole v předem definované světelné rovině. Příklad záznamu proudění kouřovou metodou jsou vidět na obrázcích (Obr. 6) a (Obr. 7).



Obr. 6 - Záznam proudění kouřovou metodou (1SS - boční pohled)



Obr. 7 - Záznam proudění kouřovou metodou (2SS - spodní pohled)

Měření průtoku

Měření průtoku tekutin se provádí většinou jako měření objemového toku \dot{V} [m³/s] anebo jako měření hmotnostního toku \dot{m} [kg/s], přičemž mezi těmito veličinami je určena jednoduchá závislost

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \quad (1.3)$$

kde

ρ – hustota tekutiny [kg/m³],

a jelikož je hustota tekutin stavovou veličinou je zapotřebí sledovat i ostatní veličiny a to zejména teplotu, tlak, vlhkost plynů popřípadě i složení měřené látky [3].

Měření průtoku probíhá více způsoby a je založeno na různých principech, kterým jsou přizpůsobeny samotné přístroje pro měření průtoku:

- a) Měření před a za tvarovou změnou (**Clony**, Venturiho trubice, Dýzy)
- b) Pitotova a Prandtlůva trubice – jedná se o rychlostní sondy vkládané do proudu tekutiny. Tyto sondy jsou vybaveny tlakovými odběry pro snímání celkového a statického tlaku v proudu. Odečtením těchto tlaků od sebe se zjišťuje dynamický tlak proudící tekutiny, kterým je pomocí aplikace zákona o zachování energie (Bernoulliho rovnice) určena rychlost proudění.
- c) Plováčkové průtokoměry – jsou vertikální průtokoměry s rozšiřující se trubicí, ve které se při proudění volně pohybuje plovák. Po ustálení je výšková poloha plováčku odečtena ze stupnice a tato hodnota je úměrná rychlosti proudění.
- d) Turbínové průtokoměry – jsou založeny na roztočení rotoru s lopatkami, který je vložen do proudu. Otáčky jsou bezkontaktně (například indukčně) snímány a výsledné napětíové pulzy poté deklarují hmotnostní průtok tekutiny.
- e) Vírové průtokoměry – jsou průtokoměry založeny na efektu Kármánových vírů, kdy se při proudění tekutiny kolem neaerodynamického tvaru symetricky oddělují víry za touto překážkou. Tyto víry vytváří Kármánovu stezku a frekvence vznikajících vírů je úměrná rychlosti proudění tekutiny.
- f) Elektromagnetické (indukční) průtokoměry – jsou založeny na zákonu elektromagnetické indukce. Při pohybu tekutiny (vodiče) skrze homogenní magnetické pole je indukováno elektrické napětí, které je úměrné objemovému průtoku tekutiny.
- g) Ultrazvukové průtokoměry – využívají Dopplerova jevu. Do proudící tekutiny jsou vysílány ultrazvukové vlny s konstantní frekvencí. Frekvence těchto vln je ovlivněna průchodem pohyblivými pevnými částicemi, či vzduchovými bublinami v tekutině a rozdíl frekvencí původní a odražené vlny je úměrná rychlosti proudění tekutiny.
- h) Coriolisův průtokoměr – pracuje na principu vibrace měřících trubic při průchodu hmotného média. Fázový posun vůči rezonanční frekvenci je úměrný hmotnostnímu průtoku a frekvence kmitů odpovídá hustotě tekutiny.
- i) Tepelné průtokoměry (termoanemometry a kalorimetrické průtokoměry) – jsou průtokoměry, které vychází ze závislosti výměny tepla mezi kontinuálně ohříváním měřícím čidlem a proudící tekutinou. Množství předaného tepla je úměrné hmotnostnímu toku tekutiny [8, 16].

Pro měření průtoku při tomto experimentu byl vybrán jako průtokoměr vzduchový kanál se clonou. Pomocí **clony** se uskutečňuje měření tlakové difference před a za tvarovým prvkem. Místa odběrů 1 a 2 jsou vidět na obrázku (Obr. 8). Hlavní princip těchto průtokoměrů je založen na zákonu zachování energie (Bernoulliho zákoně). Pokud proud projde zúžením, ať už pozvolným nebo náhlým, vzroste kinetická energie na úkor potenciální energie (statického tlaku) za tímto prvkem. Rozdíl těchto tlakových hodnot je úměrný druhé mocnině rychlosti proudění dle rovnice (1.4),

$$v = K \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (1.4)$$

kde:

v – okamžitá rychlost proudění [m/s]

K – konstanta určující vlastnosti primárního prvku [-]

Δp – tlakový rozdíl před a za prvkem [-]

ρ – hustota tekutiny [kg/m³],

přičemž konstanta K v sobě zahrnuje rozměrové vlastnosti prvku β (poměr d/D , kde d je průměr clony a D je průměr kanálu), součinitele expanze ε a součinitele průtoku C , který dále v sobě uchovává vlastnosti rychlostního profilu (Reynoldsovo číslo) a vzdálenosti odběrových míst od clony [8, 16].

V takovém případě rovnice (1.5) vypadá následovně, za předpokladu úměrnosti rychlosti a hmotnostnímu toku

$$v = \frac{m}{\rho \cdot S} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (1.5)$$

kde:

v – okamžitá rychlost proudění [m/s]

\dot{m} – hmotnostní průtok [kg/s]

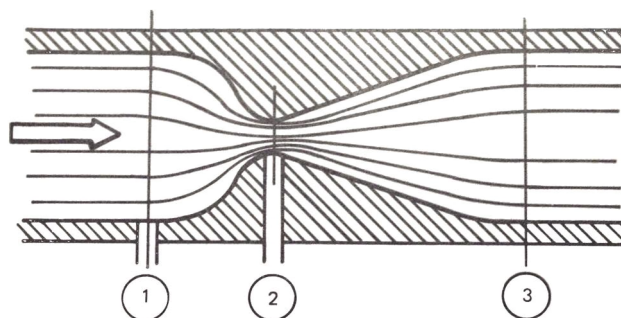
ρ – hustota tekutiny [kg/m³]

S – průřez kanálu [m²]

Δp – tlakový rozdíl před a za prvkem [-]

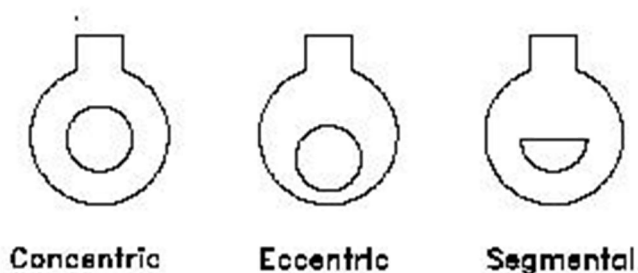
ρ – hustota tekutiny [kg/m³]

a součinitelé C a ε jsou charakteristická čísla pro různé typy škrťacích prvků [8, 16].



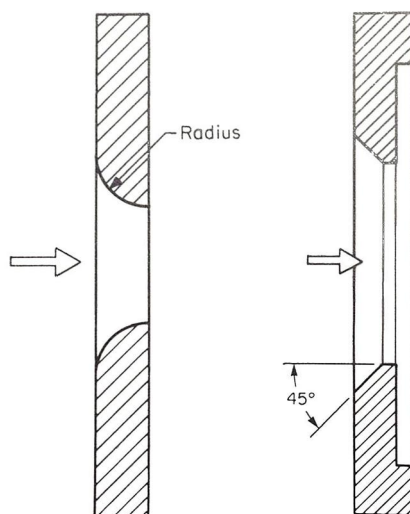
Obr. 8 - Měření tlakové difference při zúžení proudu [16]

Příklady clon s jedním otvorem jsou na obrázku (Obr. 9), kde je vidět rozdíl v umístění a poloze otvorů. Základním typem je clona s centrickým otvorem vlevo. Uprostřed je clona excentrická a vpravo je clona segmentová. Při použití excentrické clony se rozlišuje umístění otvoru. Při měření plynů se otvor umísťuje do spodní části a při měření kapalin do horní části. Existují také clony s více otvory. Ty mohou být pravidelně anebo nepravidelně rozmístěny po celé ploše clony, přičemž se mohou měnit i jejich velikosti [16].



Obr. 9 - Příklady clon s jedním otvorem [17]

Při pohledu na průřez clonou je vidět nejběžnější úprava hran otvoru (Obr. 10). Clony s radiální hranou, na obrázku vlevo, jsou hojně používány v Americe, přičemž pro Evropu je běžnější clona kónická, která je na obrázku vpravo [16].

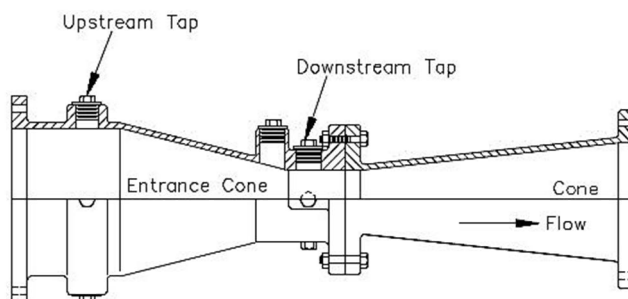


Obr. 10 - Průřez clonami [16]

Pro měření této diplomové práce bylo použito clony s centrickým umístěním otvoru ve tvaru kruhu s kónickou hranou, kde poměr průměrů d/D byl roven 0,664, což můžeme považovat za hodnotu vzdálenou limitní hodnotě 0,75, pro kterou se stávají průtokoměry méně přesné. Všeobecně mají průtokoměry se clonou přesnost v rozsahu $\pm (0,5-0,8\%)$, což je pro naše účely dostačující [16].

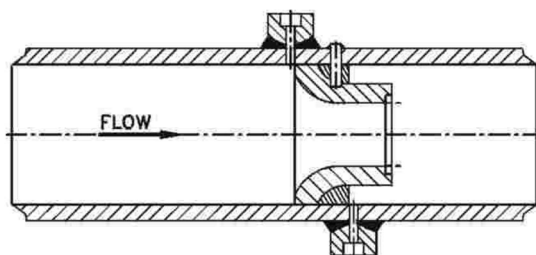
Za další možné tvarové prvky, měřící na stejném principu, se považují Venturiho trubice, dýzy či kolenové průtokoměry. Tyto průtokoměry se vyznačují aplikací ve speciálních podmínkách a upraveným tvarem primárního prvku.

Venturiho trubice (Obr. 11) je druh průtokoměru, kde se zužuje vstupní část a naopak rozšiřuje výstupní část. Toto řešení má za následek eliminaci celkových tlakových ztrát měřicího prvku. Venturiho trubice se používají obzvlášť při měření vysokých průtoků [16].



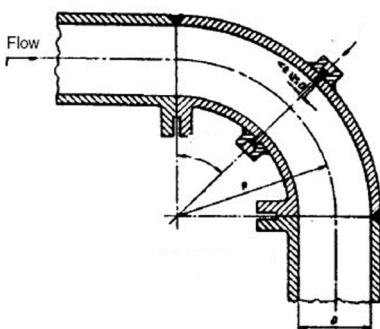
Obr. 11 - Venturiho trubice [18]

Dýzy (Obr. 12) jsou průtokoměry, které mají eliptickou nebo radiální vstupní část škrťacího prvku. Používají se při měření průtoku tekutin o vysokých teplotách anebo při vysokorychlostním proudění [16].



Obr. 12 – Dýza [19]

Kolenové průtokoměry (Obr. 13) pracují na principu měření rozdílu tlaků odebíraných uvnitř a vně oblouku. Na proudící tekutinu působí dostředivá (odstředivá) síla, která má za následek zvýšení tlaku vně oblouku [16].



Obr. 13 - Kolenový průtokoměr [20]

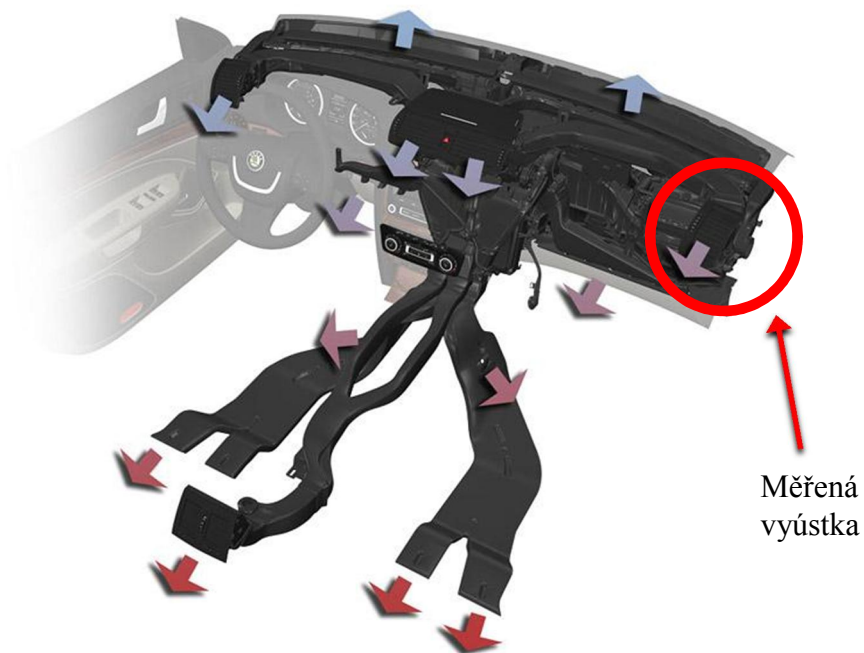
1.2 Měřený objekt

Měřeným objektem byla pravá přední boční vyústka automobilu Škoda Octavia II, který je ve výrobě od roku 2004. Tento model vozu patří již řadu let mezi nejoblíbenější automobily. Model vozu je možno vidět na obrázku (Obr. 14).



Obr. 14 - Model vozu Škoda Octavia II [7].

Distribuce vzduchu v tomto voze je znázorněna na obrázku (Obr. 15). Celý systém je tvořen vzduchovody rozcházejícími se z rozdělovače za ventilátorem a směřujícími dále po voze. Ventilátor uvádí vzduch do pohybu a spolu s nastavitelným rozdělovačem se stará o cílenou distribuci vzduchu do vnitřního prostředí. Na obrázku (Obr. 15) je také znázorněna vybraná vyústka, která byla použita pro experiment.

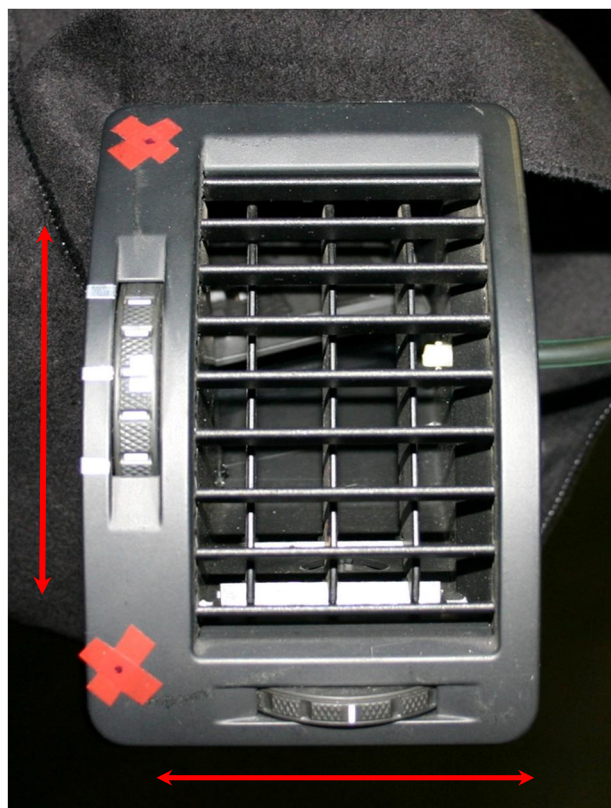


Obr. 15 - Schéma distribuce vzduchu ve voze a měřená vyústka [7].

1.3 Vyústka

Měření bylo provedeno na vyústce (Obr. 16) na straně spolujezdce u dveří. Jedná se o lamelami vybavenou vyústku schopnou horizontálního i vertikálního nastavení. Proud vzduchu je lamelami usměrňován, přičemž horizontální lamely dokáží proud vzduchu z vyústky zcela uzavřít.

Červené šipky na obrázku (Obr. 16) znázorňují možné nastavení lamel. Při nastavování horizontálních lamel může dojít k úplnému zaškrcení přívodu vzduchu, proto byly určeny úhly horizontálních lamel, pro které je vyústka deklarována jako funkční. Toto nastavení se nazývá - mezní vertikální směřování a je vysvětleno v kapitole (3.4).



Obr. 16 – Nastavitelná vyústka

2 MĚŘICÍ TRATĚ

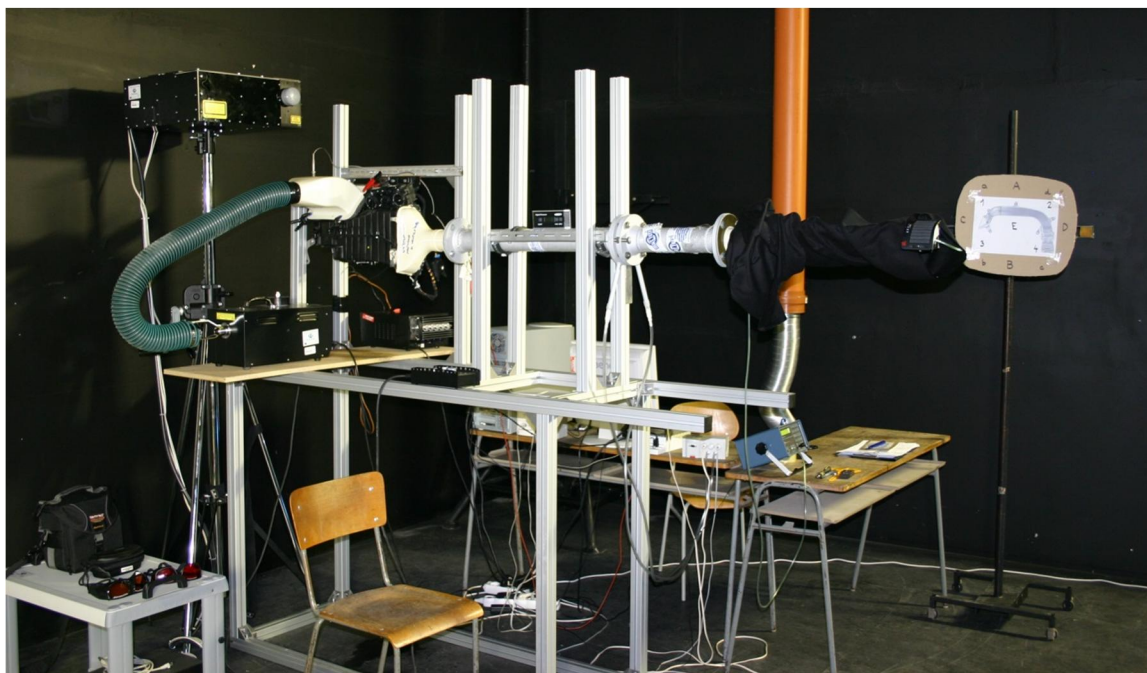
Měřicí trať byla vytvořena tak, aby reflektovala, co možná nejlépe, reálné chování klimatizačního systému v automobilu, přičemž byl kladen požadavek na jednoduchost této měřicí tratě.

Na obrázku (Obr. 17) je vidět původní sestavenou měřicí trať. Původní trať měla tři výrazné ohyby, z toho byly tři do většího úhlu než 90° , které mohou mít za následek velké tlakové ztráty a nesouměrný rychlostní profil. Toto řešení bylo voleno s ohledem na nedostatek prostoru pro samotný experiment, jelikož byl paralelně prováděn další experiment ve stejné laboratoři.

Původní měřicí trať byla vybavena ustalovacím vodorovným potrubím, avšak další dva ohyby následovaly až za touto ustalovací částí. Také změna průřezů potrubí v kombinaci s flexi hadicí mohla působit nepříznivě na proud kouře. Po zohlednění těchto nedostatků a pro dostatek prostoru v laboratoři bylo rozhodnuto vytvořit zcela novou měřicí trať (Obr. 18) a celkově přepracovat její koncept za použití nových komponent a prvků.



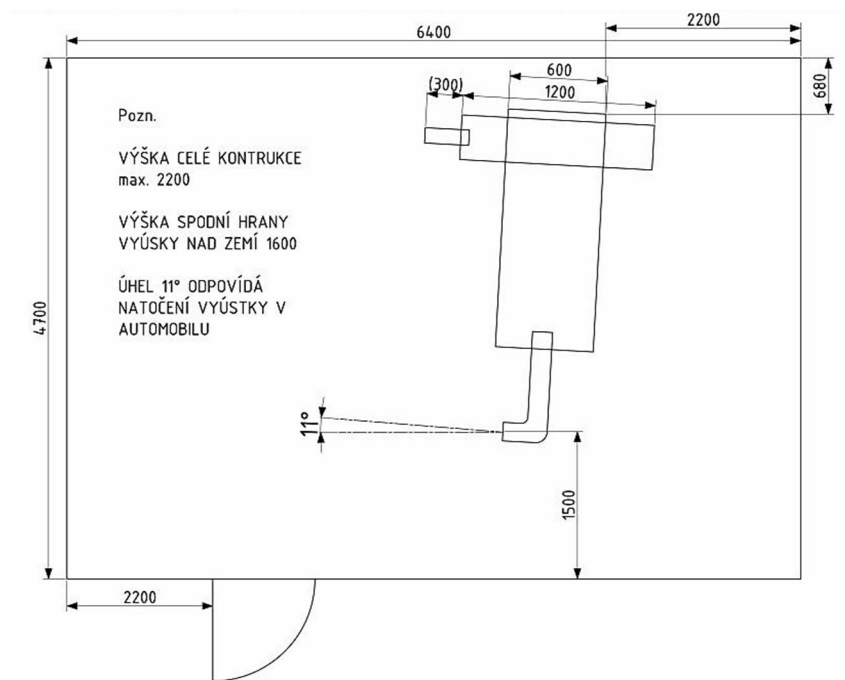
Obr. 17 - Původní měřicí trať



Obr. 18 - Nová měřicí trať (celkový pohled)

2.1 Umístění měřicí trati v laboratoři

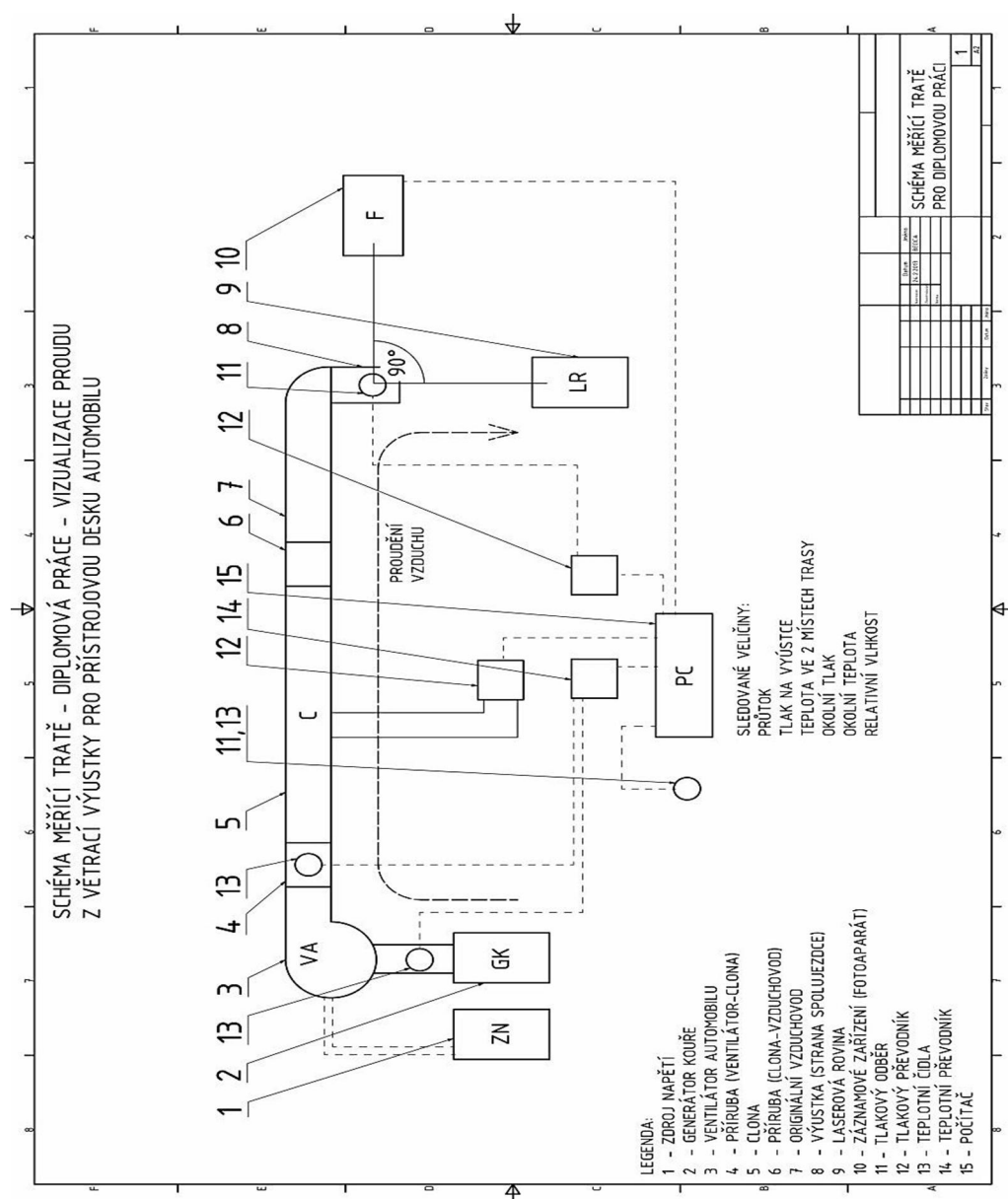
Celé měření probíhalo v budově C2 v podzemním podlaží, kde byla umístěna měřicí trať. K dispozici byla laboratoř lokálních větracích systémů (C2/213c) s dostatečně velkým prostorem, v níž probíhal pouze jeden experiment. Umístění trati (Obr. 19) bylo voleno záměrně do pravé části tak, aby vznikl dostatečný prostor pro manipulaci s potřebnými komponenty pro samotný průběh měření a vizualizace.



Obr. 19 - Umístění trati v laboratoři

2.2 Schéma a popis měřicí tratě

Měřicí trať je sestavena od přívodního kanálu z generátoru kouře přes průtokoměr se clonou až k vyústce. Trať byla navržena a složena zcela vodorovně s minimálním množstvím ohybů, zakřivení a změn průřezů. Nosnou konstrukcí je systém Alutec, ke kterému jsou připevněny zbývající části tratě. Kouř z generátoru kouře je přiváděn do rozvaděče s ventilátorem, poháněným zdrojem napětí. Proud kouře je nasáván ventilátorem a před ním je měřena první teplota kouře. Následně je kouř vytlačěn přes přechodku a modelovanou přírubu do kanálu se clonou, před nímž je měřena druhá teplota kouře. Výstup proudu kouře do původního vzduchovodu s vyústkou zabezpečuje druhá modelovaná příruba. Samotná vyústka je vložena do originálního vzduchovodu, na němž je připevněn odběr tlaku pro měření tlakové ztráty na vyústce. Dále je používána laserová rovina a fotoaparát, jako záznamové zařízení. Schéma celé tratě je na obrázku (Obr. 20). Všechny důležité komponenty jsou blíže popsány v následujících kapitolách.



Obr. 20 - Schéma tratě

Generátor kouře

Generátor kouře Safex S195G (Obr. 21) se staral o tvorbu a přísun kouře. Tento generátor je připojen na začátek měřícího potrubí. Nastavením generátoru ovlivňujeme hustotu kouře a díky dálkovému ovládání mohl být kouř pouštěn při samotném měření a fotografování. Na obrázku (Obr. 21) je také vidět speciální tryska. Tato tryska nasává okolní vzduch před vstupem do plastového potrubí a tím zabezpečuje správné parametry výstupního kouře.



Obr. 21 - Generátor kouře Safex S195G s dálkovým ovládáním

Zdroj napětí

Zdroj napětí MCP M10-330-30 (Obr. 22) měl za úkol transformovat napětí ze sítě 230 V, na napětí 12,4 V, jaké je používáno ve vozidle. Zdroj byl spojen s jednotkou ventilátoru a ta byla napojena na ovládací panel z vozidla (Obr. 23). Výkon ventilátoru byl měněn změnou napětí na zdroji. Díky dostatečné reakci ventilátoru na napětí mohla být udržována přesná hodnota jmenovitého průtoku vzduchu potrubím $30 \text{ m}^3/\text{h}$.



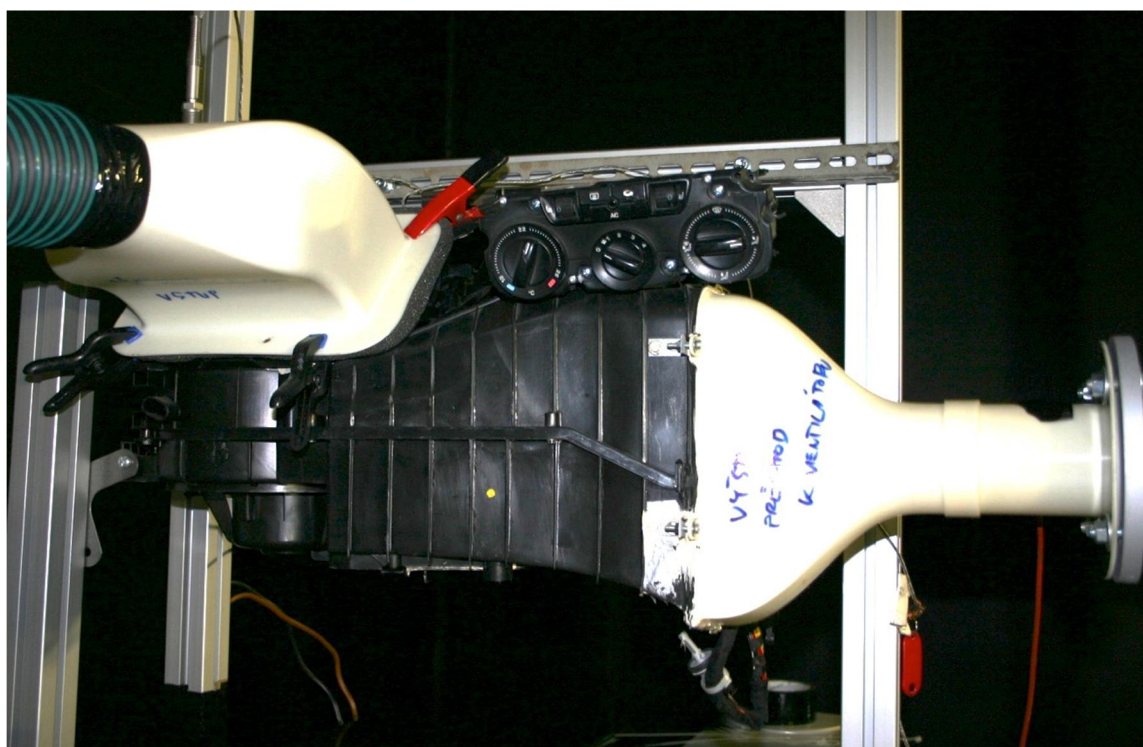
Obr. 22 - Zdroj napětí MCP M10-330-30



Obr. 23 - Ovládací panel z vozidla

Rozvaděč s ventilátorem

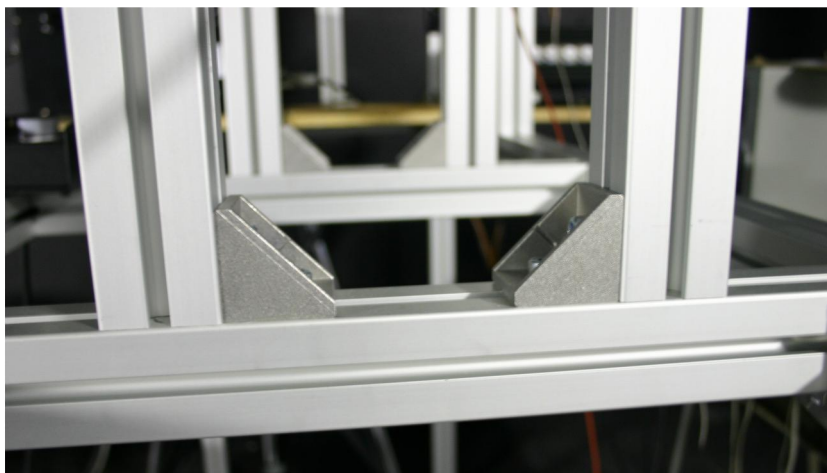
Rozvaděč s ventilátorem (Obr. 24) je součástí palubní desky osobního automobilu. Má za úkol nasávat a poté distribuovat vzduch do všech kanálů a výústek uvnitř automobilu. Je také vybaven klapkou, která zajišťuje regulaci hlavních větví vzduchovodů. Samotný ventilátor byl připojen k ovladači (Obr. 23), aby byla zabezpečena správná funkčnost a ovladatelnost. Rozvaděč byl upraven a osazen přechodkami pro další napojení na trať a dostatečně utěsněn tmelící pastou. Ventilátor byl vmontován do těla rozvaděče a připojen ke zdroji napětí. Poté byla odzkoušena jeho funkčnost a provozní podmínky.



Obr. 24 - Rozvaděč s ventilátorem

Konstrukční systém Alutec

Konstrukční systém Alutec (Obr. 25) byl zvolen jako nosná konstrukce celé měřicí tratě. Vyniká svou variabilitou a pevností. Jedná se o montážní systém hliníkových profilů a rohových kostek. Sestavením vhodného tvaru mohla být celá měřicí trať umístěna na tuto konstrukci. Rám byl navržen tak, aby bylo možno upravovat pozici měřicí tratě popřípadě vložit jinou měřicí trať s jiným typem vyústky.

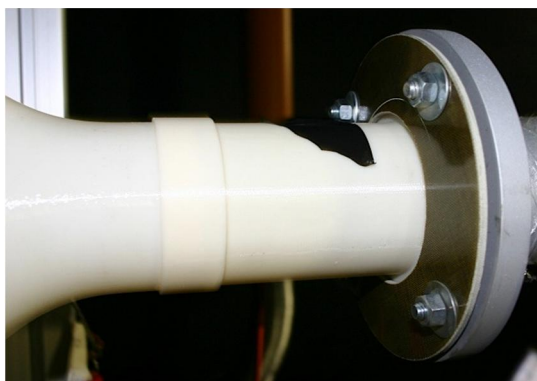


Obr. 25 - Konstrukční systém Alutec

3D přechodky a příruby

Při spojování částí tratě docházelo ke změnám spojovaných průřezů. Pro tyto případy byly použity 3D přechodky a příruby. Z minulých aplikací byla použita přechodka od hadice z generátoru kouře do těla rozdělovače s ventilátorem a druhá přechodka zajistila přechod z obdélníkového průřezu na kruhový před první přírubu a kanál se clonou. Obě přechodky jsou pevně připevněny k rozdělovači a jsou vidět na obrázku (Obr. 24).

Pro připojení clony a samotného vzduchovodu musely být vymodelovány, vytisknuty a připevněny dvě plastové příruby. Na obrázku (Obr. 26) je vidět příruba spojující přechodku od ventilátoru se clonou a na obrázku (Obr. 27) je vidět příruba spojující clonu s originálním vzduchovodem a vyústkou. Pro jejich připevnění byly vytvořeny laminátové příruby s dírami pro šrouby.



Obr. 26 - Příruba rozdělovač-clona



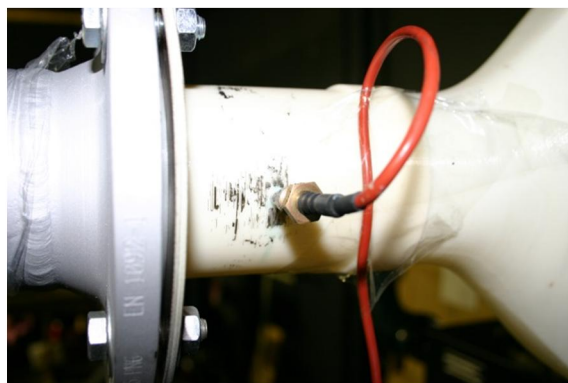
Obr. 27 - Příruba clona-vzduchovod

Snímače teploty

Měření teploty probíhalo ve dvou místech. Před ventilátorem a za ventilátorem. Použita byla odporová teplotní čidla Pt 100, která byla vložena do první přechodky (Obr. 28) a první příruby (Obr. 29). Následně byly snímače napojeny k měřicí kartě firmy National Instruments s typovým označením cDAQ-9172 a připojeny k počítači vybavenému softwarem pro záznam hodnot v programu LabView. Tato tepelná čidla pracují s přesností $\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je dostatečná přesnost pro tohle měření.



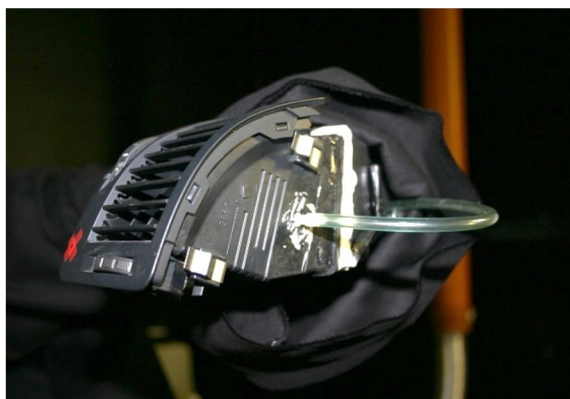
Obr. 28 - Měření teploty před ventilátorem



Obr. 29 - Měření teploty za ventilátorem

Snímač tlaku

Tlakový odběr byl zvolen před samostatný výstup na vyústce. Hadička byla vložena do vytvořené díry, jak je vidět na obrázku (Obr. 30) a připevněna v poloze kolmé k proudu kouře. Tlakový odběr byl veden do mikromanometru AIRFLOW MEDM 500 (Obr. 31), který ukazoval hodnoty statického tlaku před vyústkou. Mikromanometr měl dostatečnou přesnost $\pm 1\%$ hodnoty při tlakovém rozsahu 0-500 Pa.



Obr. 30 - Připevnění tlakového odběru



Obr. 31 - Manometr MEDM 500

Kanál se clonou a ukazatel tlakové difference

Kanál se clonou (Obr. 32) slouží jako průtokoměr pro celou měřicí trať. Ustalovací kanál se clonou byl pomocí objímek připevněn ke konstrukci a tlakový odběr před a za clonou byl odveden do ukazatele tlakové difference Airflow PTSXR (Obr. 33). Ukazatel tlakové difference pracuje s přesností $\pm 0,5\%$ hodnoty.



Obr. 32 - Kanál se clonou



Obr. 33 - Ukazatel tlakové difference

Vzduchovod a vyústka

Koncovou součástí měřicí tratě byl originální vzduchovod s vyústkou (Obr. 34). Byl použit originální stav, jakým bývají vybavovány automobily, pouze byly dodatečně zatěsněny spáry a spoje mezi plastovými díly. Celé tělo vzduchovodu a vyústky bylo připevněno ke kanálu se clonou prostřednictvím dlouhé závitové tyče.



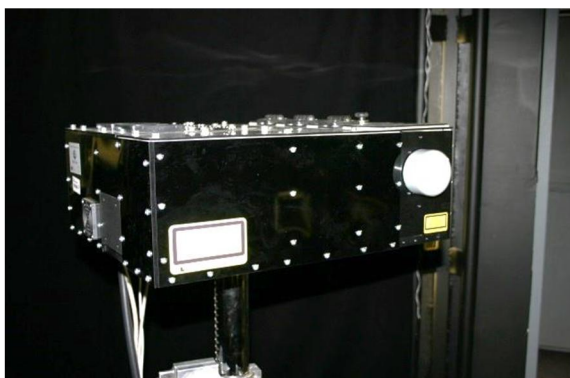
Obr. 34 - Vzduchovod s vyústkou

Laserová rovina

Laserová rovina (Obr. 35) měla za úkol poskytnout tenkou světelnou plochu směřující potřebným směrem tak, aby se osa proudu vycházejícího z vyústky nacházela v této rovině. Díky tomu bylo možno fotografovat vzniklý profil proudění z vyústky fotoaparátem.

Byl použit Laserový světelný nůž IV. třídy od firmy Coherent, jehož parametry byly udány Energetickým Ústavem. Světelná rovina byla poskytnuta se dvěma nastavitelnými držáky. Řídící část laserové roviny (Obr. 36) byla odvedena mimo samotné tělo laserové hlavy a optické trasy laseru.

Kvůli vysokému nebezpečí při používání laserové roviny s lasery IV. třídy bylo nutno izolovat laboratoř od okolí a vstupu nepovolaných osob, a zároveň bylo nutno nosit laserové ochranné brýle.



Obr. 35 - Laserová rovina



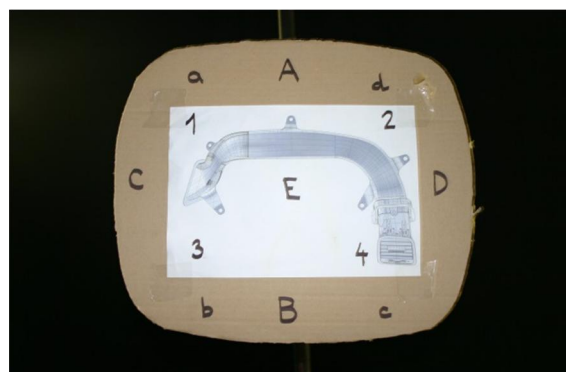
Obr. 36 - Řídící část laserové roviny

Fotoaparát

Pro fotografování byla použita digitální zrcadlovka Canon EOS 300D s objektivem Canon EFS 18-55 mm (Obr. 37). Fotografování probíhalo na manuální režim, protože bylo zapotřebí nastavovat hodnoty clony, uzávěrky a citlivosti dle světelných podmínek při experimentu. Pro kvalitní výstup a ostrost fotografií byla vytvořena zaostřovací plocha (Obr. 38). Ta byla vkládána do proudu kouře a byla totožná s rovinou laserové roviny. Tímto byla zabezpečena dostatečná ostrost fotek ve zvolené rovině.



Obr. 37 - Fotoaparát Canon EOS 300D



Obr. 38 – Zaostřovací plocha

Počítač se softwarem

Při zaznamenávání měřených hodnot bylo využito laboratorního počítače. Komunikaci mezi měřicími prvky a počítačem zabezpečovaly převodníky signálu. Samotný program pro znázornění a zápis hodnot byl vytvořen v softwarovém prostředí LabView. Pro úpravu fotografií bylo využito programu IrfanView, JpegCrops a PhotoFiltre. Pro tvorbu okrajových hodnot proudu byl použit program vytvořený na Energetickém ústavu v softwaru Delphi. Následné výstupní hodnoty úhlů okraje proudu a osy proudu poskytoval software Mathcad s připraveným programem vytvořeným také na Energetickém ústavu. Poslední softwarem byl Microsoft Excel, ve kterém byly hodnoty roztříděny a zpracovány jejich hodnoty s veškerými potřebnými přepočty.

Snímač okolního prostředí

Při experimentu bylo zapotřebí zaznamenávat hodnoty okolního prostředí. Byla zapisována okolní teplota, barometrický tlak a relativní vlhkost. Pro měření okolí byla použita měřicí stanice Comet D 4141 (Obr. 39), s externími čidly pro větší přesnost, a hodnoty byly zapisovány pro jednotlivá nastavení vyústky. Přesnost měřicí stanice byla:

Teplota – interní čidlo -10 +60°C, externí čidlo -10 +60°C, rozlišení 0,1°C, přesnost 0,1°C

Vlhkost – 0-100% RV, rozlišení 0,1% RV, přesnost 2,5% RV při (5-95% RV a 23°C)

Tlak – 800-1100 hPa, rozlišení 0,1 hPa, přesnost ± 2 hPa při 23°C.



Obr. 39 - Měřicí stanice Comet D 4141

Problémy při sestavování a používání tratě

Tvorba 3D přírub - pro správné spojení částí musely být vymodelovány a vytvořeny příruby v 3D tiskárně uPrint na ústavu strojírenské technologie Fakulty Strojního Inženýrství. Modelování pomocí Autodesk Inventoru bylo nutné pro rychlé vytvoření přírub. Tisk obou přírub je vidět na obrázku (Obr. 40). Tiskárna pracuje na principu fused deposition modeling, jedná se o stavbu modelu a podpůrné konstrukce, vrstvu po vrstvě, zdola nahoru a následně dochází k odstranění podpůrné vrstvy. Materiál výtisku je z konstrukčně pevného a tepelně odolného ABS (AkrylonitrilButadienStyren) termoplastu [10].



Obr. 40 - Tisk 3D přírub v tiskárně uPrint

Utěsnění měřicí tratě a jejích částí - jedním z největších problémů byly netěsnosti na samotném rozdělovači a originálním vzduchovodu. Netěsnosti byly ucpány a zatmeleny.

Kondenzace kouře na ventilátoru - při samotném měření docházelo ke kondenzaci kouře a skapávání emulze do těla ventilátoru. Změnou emulze a nastavením výkonu ventilátoru byla tato kondenzace umírněna a po měření byl vždy ventilátor vymontován a vysušen.

Odstranění reflexních ploch pro focení - na konstrukci tratě a kolem ní se nacházelo množství světelně odrazivých ploch, které by při focení způsobovaly odlesky světla z laserové roviny, a proto byly tyto plochy a předměty pokryty černou látkou nebo nastříkány černým matným sprejem.

3 MĚŘENÍ

Experiment probíhal pro dva režimy – proudění do volného prostoru a proudění do ohraničeného prostoru. Pro oba režimy bylo měřeno pět poloh vyústky (Obr. 41). Všechny polohy budou z důvodu přehlednosti a rychlosti v následujícím textu značeny zkratkami (SS - střed-střed, LS - levá-střed, PS - pravá-střed, SD - střed-dolní, SH - střed-horní).

Během celého průběhu měření bylo zapotřebí zaznamenávat měřené veličiny, udržovat sledované veličiny, fotografovat a systematicky ukládat vzniklá data pro pozdější zpracování.

Průběh měření je popsán v kapitole (3.3).



Obr. 41 - Přehled možných nastavení poloh vyústky

3.1 Měřené veličiny

Při experimentu bylo zapotřebí sledovat určité parametry a hodnoty (teplota, tlak a relativní vlhkost):

Teplota - Teplota okolí byla měřena pomocí měřicí stanice Comet D 4141 a zaznamenávána pro jednotlivá nastavení poloh vyústky.

Teplota před ventilátorem a za ventilátorem měřena pomocí odporových snímačů teploty Pt 100 a výsledné hodnoty byly zapisovány v programu LabView.

Tlak - Barometrický tlak v celé laboratoři byl měřen měřicí stanicí Comet D 4141 a zaznamenáván pro jednotlivá nastavení poloh vyústky.

Statický tlak na vyústce byl odebírán a měřen mikromanometrem MEDM 500 a zaznamenáván pro jednotlivá nastavení poloh vyústky.

Tlaková difference na cloně byla měřena manometrem Airflow PTSXR a zaznamenávána pro jednotlivá nastavení poloh vyústky.

Vlhkost - Relativní vlhkost vzduchu v laboratoři byla měřena měřicí stanicí Comet D 4141 a zaznamenávána pro jednotlivé nastavení poloh vyústky.

Rozsah hodnot měřených veličin

Teplota okolí – volný prostor (16,9 °C – 18,4 °C)
omezený prostor (19,6 °C – 22,4 °C)

Barometrický tlak - volný prostor (974,8 hPa – 988,3 hPa)
omezený prostor (1010,1 hPa – 1017,2 hPa)

Relativní vlhkost - volný prostor (36,1 % - 40,7 %)
omezený prostor (51,4 % - 60,5 %)

Tlak na vyústce – volný prostor (Tab. 1)
omezený prostor (Tab. 2)

Tab. 1 - Tlak na vyústce při proudění do volného prostoru

Statický tlak na vyústce (Pa)		
	6,2	
23	3,6	22,1
	2,2	

Tab. 2 - Tlak na vyústce při proudění do omezeného prostoru

Statický tlak na vyústce (Pa)		
	6,5	
21,6	4,6	20,8
	2,5	

3.2 Sledované veličiny

Hlavní sledovanou veličinou byl průtok vzduchu. Pro správné nastavení požadované hodnoty průtoku $30 \text{ m}^3/\text{h}$ bylo zapotřebí vypočítat potřebnou tlakovou diferenci Δp_2 na cloně. Bylo potřeba určit závislost objemového toku na tlakové diferenci, jelikož tyto hodnoty byly známy pro použitou clonu.

Výpočet požadované tlakové difference Δp_2 :

Jako první je potřeba určit závislost objemového toku na rychlosti proudění. Tuto závislost popisuje rovnice (3.1)

$$\dot{V} = v \cdot S \quad (3.1)$$

kde:

\dot{V} – objemový tok tekutiny [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

v – rychlost proudění [m/s]

S – průřez [m^2] [21].

Dosazením rovnice (3.1) do rovnice (1.4) dostáváme novou závislost objemového toku na tlakové diferenci. Výsledná rovnice má tvar (3.2).

$$\dot{V} = K \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_1}{\rho}} \quad (3.2)$$

kde:

\dot{V} – objemový tok tekutiny [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

K – konstanta určující vlastnosti primárního prvku [-]

S – průřez [m^2]

Δp – tlakový rozdíl před a za prvkem [-]

ρ – hustota tekutiny [kg/m^3],

použitím rovnice (3.2) s parametry zvolené clony a druhé rovnice (3.2) s požadovaným průtokem dostaneme vzájemnou závislost průtoků a tlakových diferencí. Tuto závislost, po vyjádření požadované neznámé tlakové difference, popisuje rovnice (3.3)

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \cdot \frac{v_2^2}{v_1^2} \quad (3.3)$$

kde:

\dot{V}_1 – objemový tok tekutiny se zvolenou clonou [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Δp_1 – diferenční tlak se zvolenou clonou [Pa]

\dot{V}_2 – zvolený objemový tok tekutiny [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Δp_2 – neznámý diferenční tlak [Pa].

Po vložení známých hodnot dostáváme tlakovou diferencí na cloně, pro kterou bude jmenovitý průtok měřicí trati $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Tuto hodnotu budeme nastavovat na cloně.

$$V_1 = 90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \Delta p_1 = 300 \text{ Pa}, V_2 = 30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \Delta p_2 = ? \text{ Pa}$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \cdot \frac{V_2^2}{V_1^2} = 300 \cdot \frac{30^2}{90^2} = 33,33 \text{ Pa} \quad (3.4)$$

Výsledná hodnoty tlakové difference je 33,33 Pa.

3.3 Postup měření

Měření probíhalo v několika krocích. Tyto kroky se opakovaly pro všechna nastavení vyústky a režimy proudění. Celý postup měření je shrnut do následujících kroků.

- a) zapnutí rozvaděče pro ventilátory laboratoře
- b) připojení do sítě všech komponent a následné zapnutí počítače, zdroje napětí, generátoru kouře, laserové roviny (bez spuštění laseru), mikromanometru a měřicí stanice Comet
- c) nastavení vyústky na polohu SS (střed-střed)
- d) nastavení požadovaného průtoku $30 \text{ m}^3/\text{h}$
- e) nastavení určité polohy na vyústce
- f) zaznamenání stavu prostředí (atmosférický tlak, okolní teplota a teplota rosného bodu) a statického tlaku na vyústce
- g) vpuštění zkušebního proudu kouře pro správné vložení zaostřovací plochy do osy proudu a následné umístění fotoaparátu se zaostřením do zaostřovací plochy
- h) odsátí zbytkového kouře, uzavření laboratoře, zhasnutí světel, zapnutí laserové roviny a zesílení výkonu
- i) spuštění programu v LabView, ustálení proudů vzduchu v laboratoři, vpuštění kouře, fotografování 12 snímků (tento krok byl opakován)
- j) odstavení kouře, zeslabení a vypnutí laseru, zastavení programu v LabView, aktivace osvětlení a odsávání laboratoře

Nastavení požadovaného průtoku – zvolený průtok $30 \text{ m}^3/\text{h}$ vzduchu měřicí trati bylo potřeba vždy předem nastavit. Nastavování probíhalo při sepnutém třetím stupni ventilátoru a středním nastavení obou lamel vyústky. Samotná regulace průtoku spočívala v nastavování napětí na zdroji napětí, který poháněl ventilátor. Díky změnám napětí se měnily otáčky ventilátoru a tím byl regulován celkový průtok potrubím. Ukazatelem správného nastavení průtoku byla tlaková difference Δp_2 na cloně, kterou bylo potřeba nastavit na hodnotu 33,3 Pa.

Pro vhodné **nastavení fotoaparátu**, aby bylo dosaženo kvalitních snímků, bylo zapotřebí změnit nastavení citlivosti ISO 100, zvýšit dobu závěrky na 1 sekundu a regulovat clonu fotoaparátu na hodnotu 7,1. Tyto hodnoty byly vybrány po odzkoušení více snímků a srovnání jejich kvality.

Hodnoty výkonu laserové roviny používané při měření se lišily pro jednotlivá nastavení vyústky. Při měření proudu do volného prostoru byl zvolen výkon laseru 0,28 W téměř pro všechna nastavení. Při této hodnotě byl zabezpečen dostatek světla pro fotoaparát a nedocházelo k přesvícení fotografií. Při měření podél stěny docházelo k odrazu světla, a proto byl výkon laseru redukován na hodnotu 0,14 W.

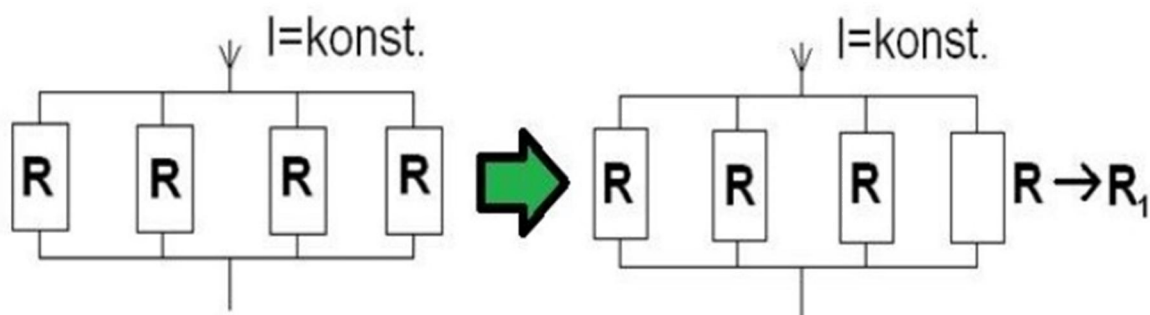
Jediným problémem bylo fotografování bočního pohledu při spodním mezním nastavení lamel. Kouř směřoval do laserové roviny. Proto byl výkon laseru zvýšen na hodnotu 0,60 W a měření probíhalo pro 6 fotografií v řadě za sebou.

Počet reprezentativních fotografií potřebných pro určení úhlů byl stanoven na 10 snímků. Proto bylo měřeno a zaznamenáváno celkem 24 snímků pro jednotlivá nastavení vyústky. Fotografováno bylo vždy 12 snímků v řadě za sebou. Poté bylo měření odstaveno kvůli velkému množství kouře v laboratoři. Ten byl následně odsáván z laboratoře. Tímto se prodlužoval celkový měřicí čas, avšak mezičas byl využit pro kontrolu kvality snímků a jejich roztřizení.

3.4 Mezní vertikální nastavení

Měřená vyústka je vybavena vertikálními a horizontálními nastavitelnými lamelami. Tyto lamely slouží k regulaci proudu vystupujícího vzduchu a navíc horizontální lamely mohou proud vzduchu zcela uzavřít. Proto bylo zapotřebí určit úhel nastavení horizontálních lamel, které ovlivňují vertikální směr proudu, tak, aby proud vzduchu vystupující z vyústky měl dostatečné parametry pro komfort cestujících.

Experiment probíhal pouze pro jednu vyústku, přičemž v automobilu jsou čtyři (popřípadě pět) vyústky, proto musel být stanoven vztah mezi reálnou a laboratorní situací. Pro řešení tohoto problému a propojení vzájemných vztahů bylo využito metody analogie elektrického obvodu při paralelním zapojení n větví s odpory a následnou změnou jednoho z odporů, jak je vidět na (Obr. 42) [11, 12].



Obr. 42 - Schéma změny odporu [11, 12].

Takové zapojení má všechny odpory stejné a při zachování konstantního proudu můžeme využít analogii pro klimatizační systém automobilu. V tomto případě elektrické odpory R_n nahrazují součinitele místních ztrát ζ_n , proud I nahrazuje rychlost proudění (respektive průtok) Q a napětí U nahrazuje tlakovou diferencí Δp .

Předpokladem je, že při změně nastavení jedné větve dojde k přerozdělení proudu vzduchu do ostatních větví tak, aby byl konstantní průtok celým systémem. Dalším

předpokladem byla konstantní hustota vzduchu po celou dobu měření. Díky těmto předpokladům mohlo být analoie využito.

Návrhem bylo, že při změně nastavení horizontálních lamel dojde ke zvýšení součinitele místní ztráty ξ_l v regulované větvi, avšak hodnoty ostatních součinitelů ξ_n se výrazně nezmění. Toto nastavení horizontálních lamel bylo považováno za jejich mezní nastavení [11, 12].

Použitím rovnice pro napětí (3.6) a rovnice pro tlakovou diferencii způsobenou místní ztrátou (3.7)

$$U = I \cdot R \quad (3.6)$$

kde:

U – napětí [V]

I – proud [A]

R – odpor [Ω]

a

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{Q^2}{2S^2} \cdot \rho \quad (3.7)$$

kde:

Δp – tlakový rozdíl před a za prvkem [Pa]

ξ – součinitel místní ztráty [-]

Q – průtok [m^3/h]

S – průřez kanálu v místě měření [m^2]

ρ – hustota tekutiny [kg/m^3]

dostaneme jejich úpravou a výslednou rovnici (3.8), která popisuje závislost tlakové difference měřené na vyústce při plně otevřeném nastavení obou lamel (nastavení SS) a tlakové difference měřené na vyústce při mezním nastavení horizontálních lamel (nastavení SD a SH)

$$\Delta p_{\text{otevřen}} = \frac{\xi_{\text{mez}}}{\xi_{\text{otevřen}}} \cdot \Delta p_{\text{mez}} \cdot \frac{v_{\text{mez}}^2}{v_{\text{otevřen}}^2} \quad (3.8)$$

kde:

Δp_{mez} – diferenční tlak na vyústce při mezním nastavení [Pa]

$\Delta p_{\text{otevřen}}$ – diferenční tlak na vyústce při plně otevřeném nastavení [Pa]

ξ_{mez} – součinitel místní ztráty při mezním nastavení [-]

$\xi_{\text{otevřen}}$ – součinitel místní ztráty při plně otevřeném nastavení [-]

v_{mez} – rychlost proudění při mezním nastavení [m/s]

$v_{\text{otevřen}}$ – rychlost proudění při plně otevřeném nastavení [m/s] [11, 12].

Pro určení mezního vertikálního nastavení bylo zapotřebí držet rychlost proudění vzduchu v ose (popřípadě průtok vzduchu) na konstantní hodnotě. Pro určení úhlu, kdy ještě deklarujeme vyústku jako funkční, bylo zapotřebí zjistit procentuální úbytek proudu, při kterém je dodáváno dostatečné množství vzduchu. Měření probíhalo vystavením osoby do proudu vzduchu a nastavováním lamel. Tímto docházelo ke snižování průtoku, přičemž

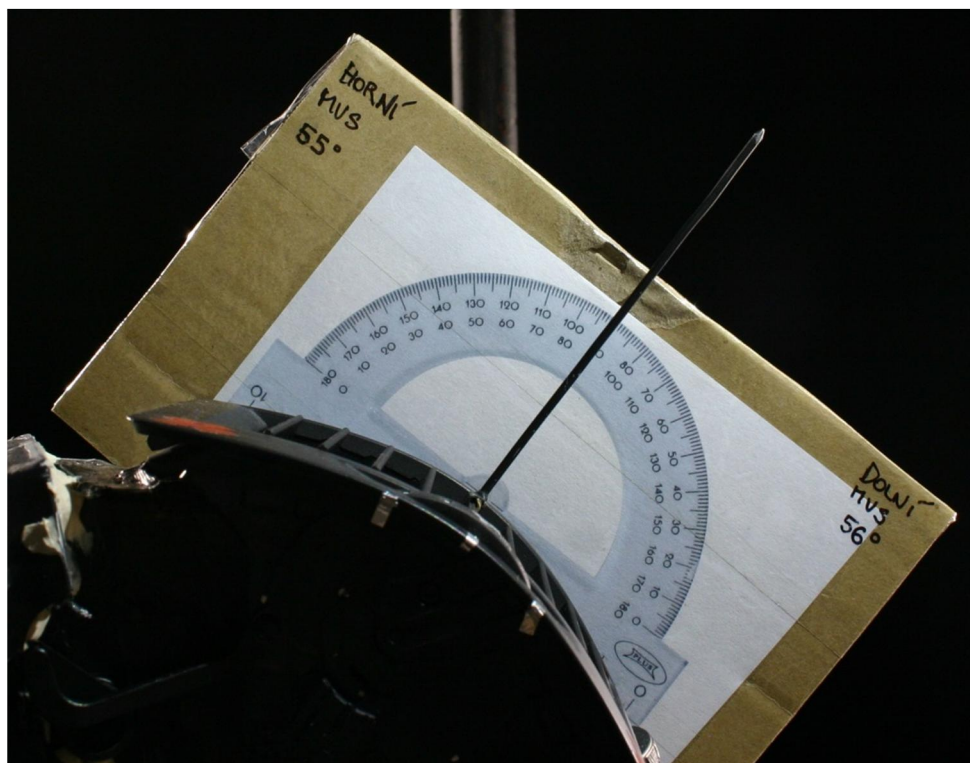
bylo subjektivně hodnoceno množství proudícího vzduchu. Výsledná hodnota, kdy osoba pocítila úbytek proudu, byla stanovena hodnota $\Delta Q = 30\%$ procentuálního úbytku průtoku vzduchu.

Jelikož byl tento experiment řešen v předešlých letech, byly použity hodnoty z tohoto měření. Výsledné hodnoty byly určeny jako aritmetický průměr deseti měření [11, 12].

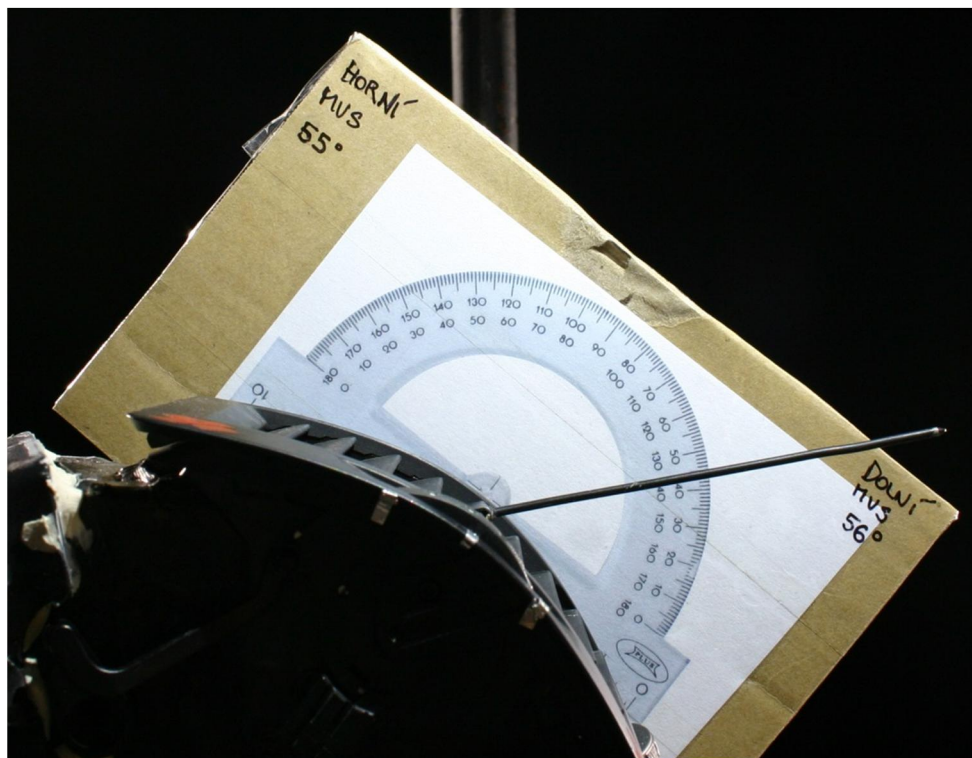
Tab. 3 - Měření mezního vertikálního nastavení horizontálních lamel

Měření číslo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
Horní nastavení	54,5	55	55,5	55	54,5	54,5	53,5	55	53,5	54	54,5°
Spodní nastavení	56	56	56	57	56,5	57	56	55,5	54,5	55	55°

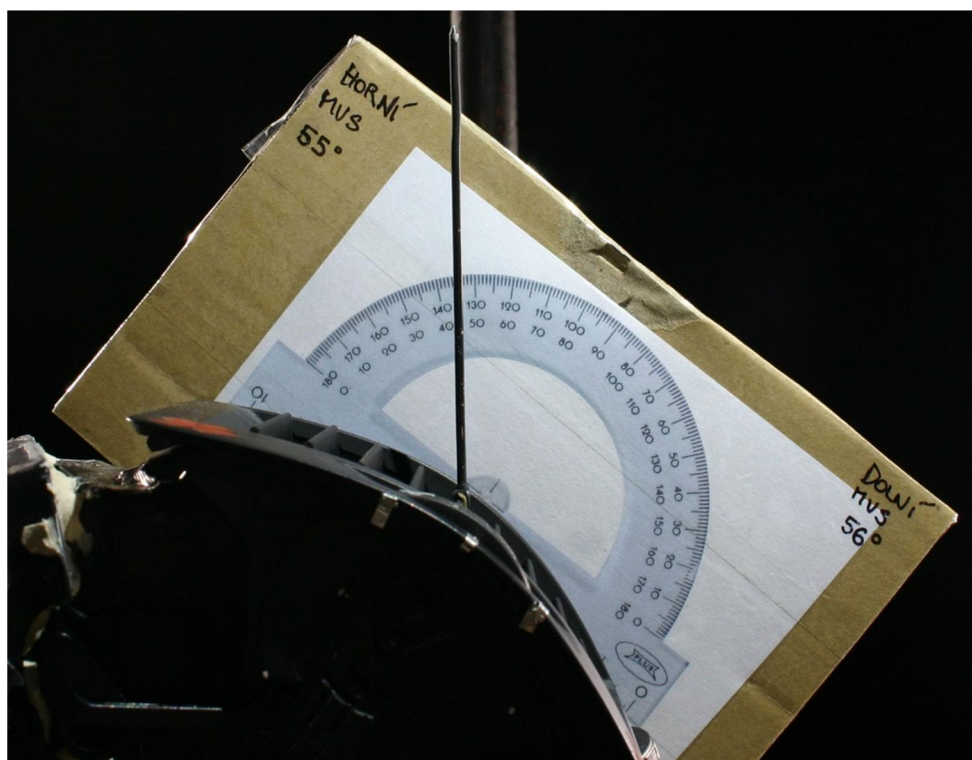
Pro jednoduchou demonstraci byl přiložen úhloměr k vyústce při středním nastavení horizontálních lamel a správně nastaven (Obr. 43). Spodní mezní nastavení horizontálních lamel je demonstrováno na (Obr. 44) a horní mezní nastavení horizontálních lamel je demonstrováno na (Obr. 45). Tyto polohy byly zaznamenány na vyústce kvůli opakovanému nastavování poloh lamel.



Obr. 43 - Znázornění úhlu lamel při nastavení SS



Obr. 44 - Spodní mezní nastavení horizontálních lamel - spodní vertikální nastavení



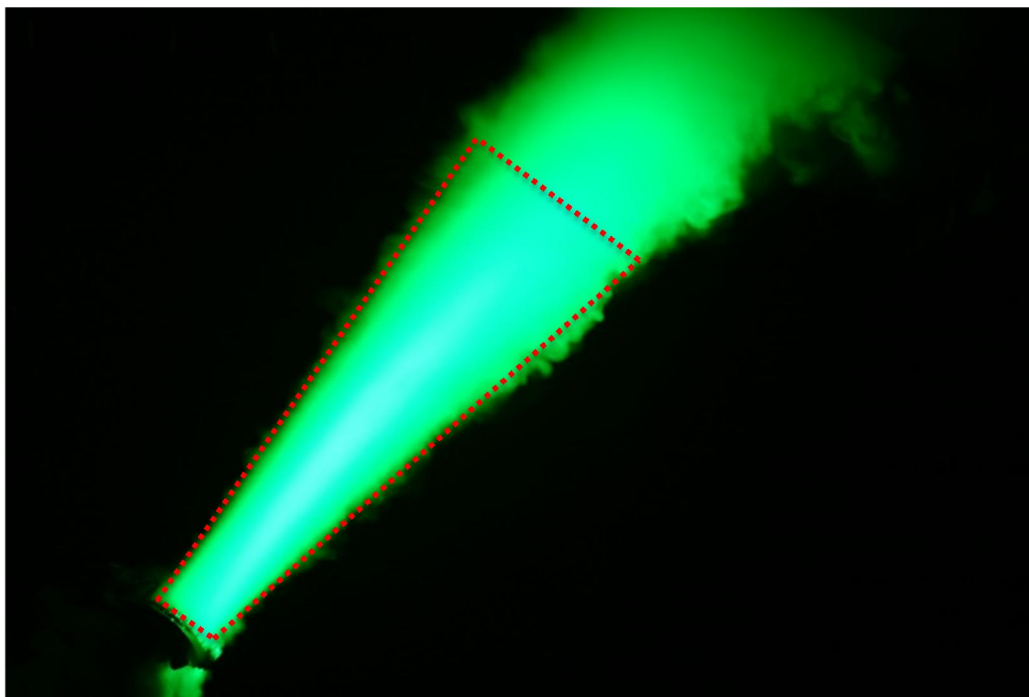
Obr. 45 - Horní mezní nastavení horizontálních lamel - horní vertikální nastavení

4 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

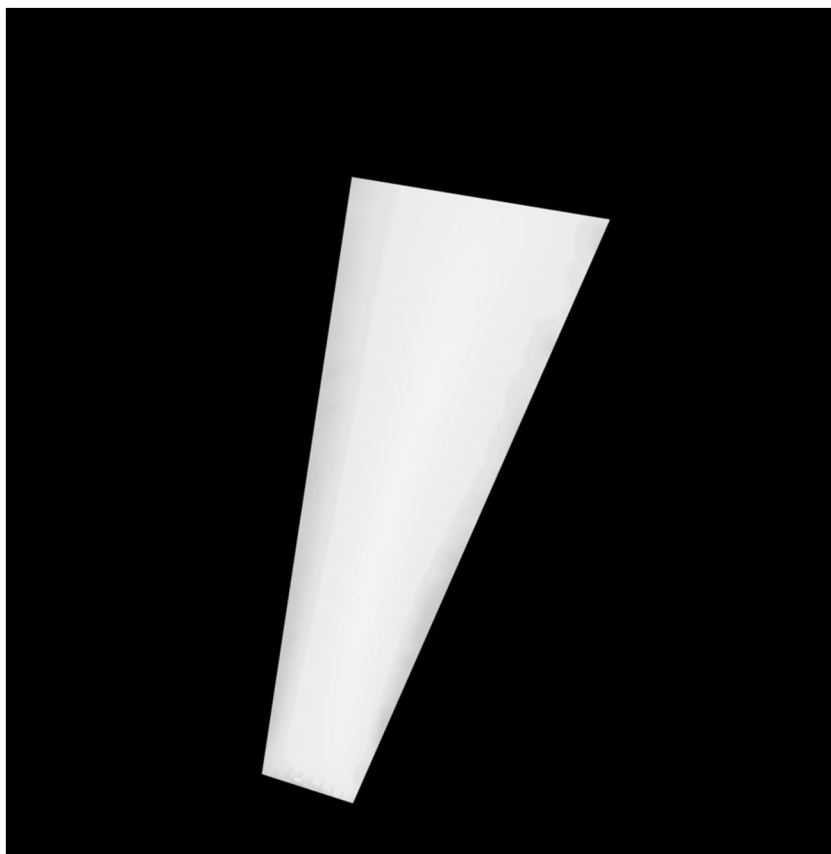
Pro správné vyhodnocení výsledků bylo zapotřebí získat fotografický záznam vizualizovaného proudu a následně tyto fotografie upravit a podrobit softwarovým výpočtům. Výsledkem z fotografií je sklon a vybočení osy proudu a hranic proudu pro veškerá nastavení vyústky.

4.1 Pořízení a úprava fotografií

Pro každé nastavení vyústky bylo pořízeno 24 fotografií. Z toho bylo vybráno 10 reprezentativních snímků, které byly následně upraveny pro další zpracování. Vybrány byly ty fotografie, na kterých docházelo k minimálním turbulencím okrajů proudu. Fotky se vzniklými anomáliemi byly také vyřazeny. Úprava byla prováděna pomocí dvou programů. Program JpegCrop se staral pouze o ořezání 10 fotografií, protože bylo zapotřebí docílit stejné polohy vyústky na fotce po ořezu. Následně byl použit program IrfanView, kde byla nastavena dávková konverze fotek. Upravována byla celková barevnost fotografie. Fotografie byla převedena ze zelené barvy, kterou produkovala laserová rovina, do odstínu bílé barvy, jelikož tímto byla ulehčena další práce se softwarem Delphi. Byl také zvýšen jas fotografií, upravena gamma korekce a nakonec byla fotografie vhodně otočena. Pro některá nastavení nebylo možno bezpečně určit okrajové přímky v programu MathCad. Proto byla navržena úprava fotografií vložením okrajových trendových přímek. To zabezpečilo vyrovnaní okrajů proudu a další zpracování proběhlo bezproblémově. Okrajová přímka byla vkládána s ohledem na hranici proudu. Na (Obr. 46) je vidět fotografii proudu před úpravou s vloženou hranicí proudu, přičemž na (Obr. 47) je již vidět fotografii proudu po výše zmíněné úpravě.



Obr. 46 - ISS (před úpravou)

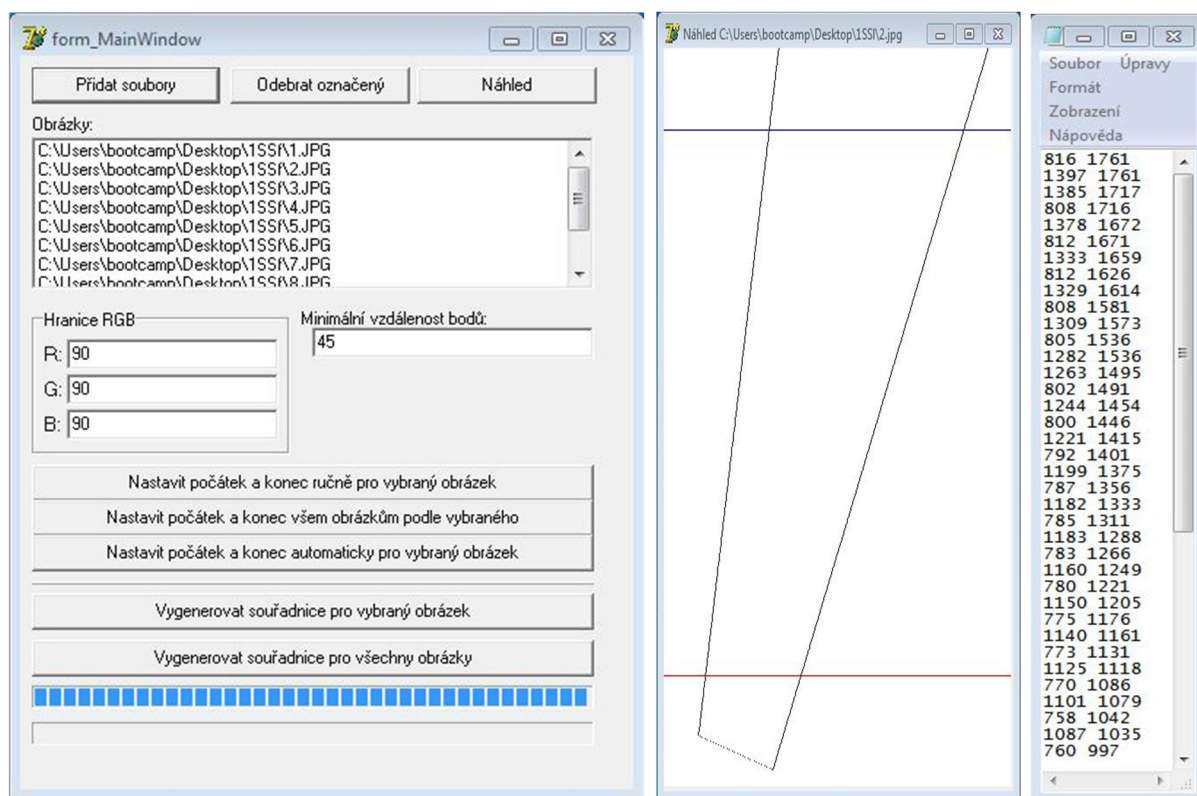


Obr. 47 - 1SS (po úpravě)

4.2 Určení souřadnic okrajů proudu programem Delphi

Po správném zpracování fotografií byly tyto fotografie vloženy do připraveného programu v softwaru Delphi, vyvinutém na Energetickém Ústavu. Program pracoval s jasovou složkou barev fotografie. Každá barva může být popsána kombinací třech základních barev, červené-zelené-modré (RGB) a jejich jednotlivými mohutnostmi. Jelikož při nulových mohutnostech všech složek dostáváme barvu černou, a naopak, při maximálních mohutnostech složek dostáváme barvu bílou, program byl schopen rozeznat rozdíly mohutností barev v blízkosti okraje proudu a do těchto míst vložit bod a zaznamenat jeho polohu v souřadném systému XY [21].

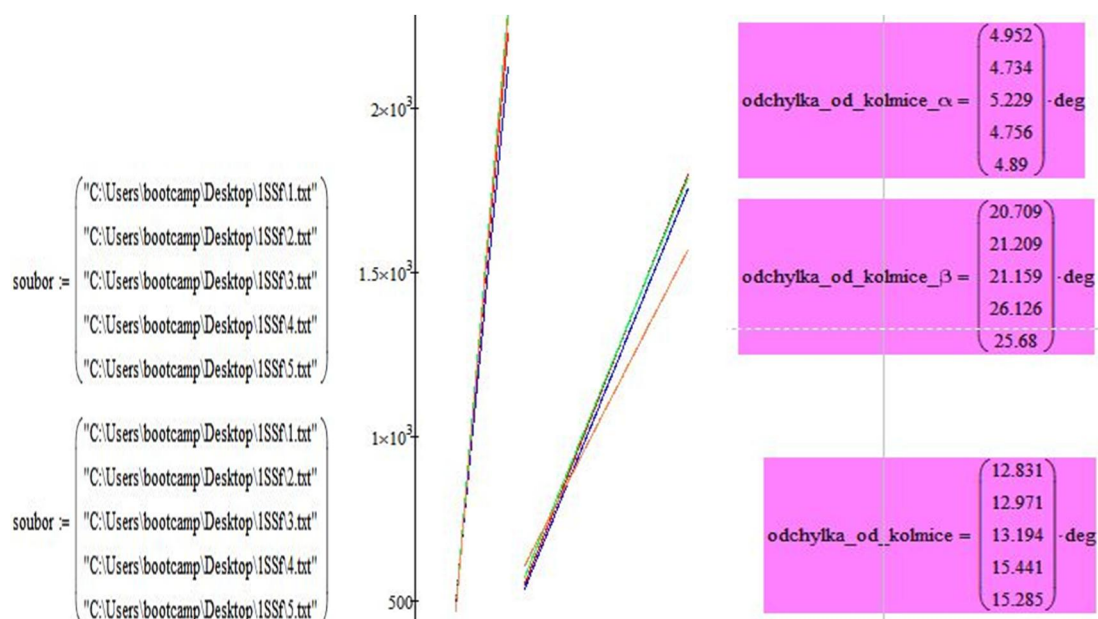
Po spuštění programu musely být vloženy požadované snímky. Následně byl vybrán snímek a jeho pomocí byl zvolen počátek a konec, ve kterém program generoval body na hranici proudu. Následně byly zvoleny hodnoty mohutností všech složek na hodnotu 90 a byla zvolena hodnota vzdálenosti sousedních bodů, převážně na hodnotu 45. Tyto hodnoty byly zvoleny z hlediska předchozích zkušeností a pro zachování malých datových objemů generovaných dat. Poté byl spuštěn program, který generoval body pro jednotlivé fotografie a ukládal je do textových dokumentů. Postup, od vložení upravených fotografií po vygenerování souřadnic bodů, je vidět na (Obr. 48).



Obr. 48 - Postup při použití programu Delphi

4.3 Určování okrajových přímk a os proudu pomocí MathCad

Vygenerované souřadnice v textových dokumentech byly poté vkládány do programu MathCad. V něm byl napsán program pro určování úhlů okrajových přímk a os od svislé osy, který byl také vyvinut na Energetickém Ústavu. V programu byly vytvořeny matice, do kterých byla zadávána souborová cesta k těmto textovým dokumentům. Vždy bylo vloženo pouze pět souborů, a to z důvodu výpočetní náročnosti programu. Program poté zakreslil body do souřadného systému a proložil jimi přímky. Následně byly určeny úhly hraničních přímk a osy proudu od svislé osy. Hodnoty byly vypsány do přehledných matic. Postup od vložení souborů po vygenerování úhlů je vidět na obrázku (Obr. 49).



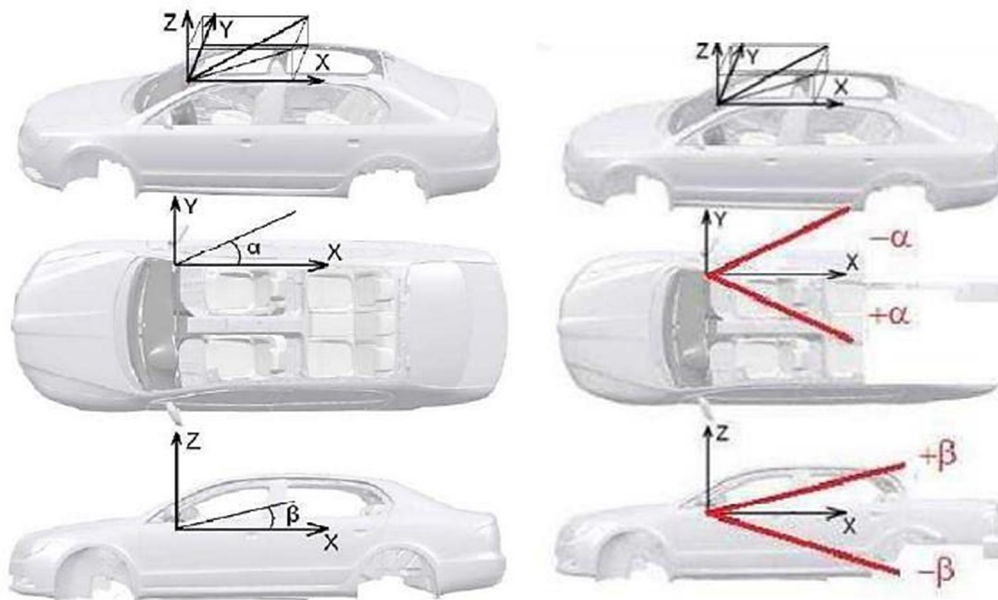
Obr. 49 - Postup při použití programu MathCad

4.4 Microsoft Excel

Microsoft Excel sloužil jako datový správce. Byl vytvořen soubor, ve kterém byly přehledně zaznamenány měřené hodnoty pro každé nastavení vyústky. Stejně tak byly zde vloženy výsledné hodnoty z programu MathCad a určeny jejich správné hodnoty po zpětné rotaci fotografií. Následně zde byly vypočteny výběrové směrodatné odchylky pro jednotlivá nastavení vyústky.

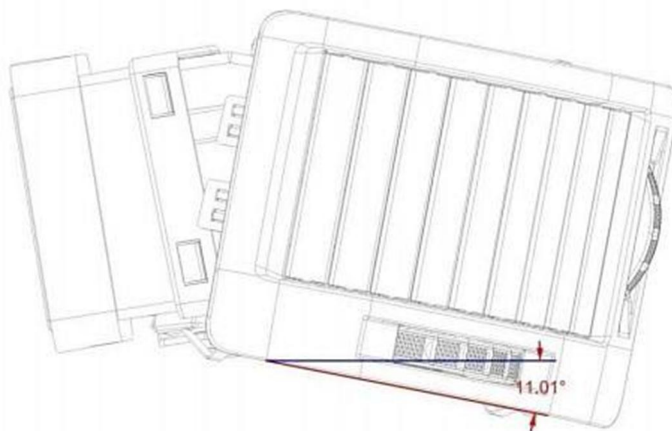
4.5 Souřadné systémy

Jelikož je vyústka situována v automobilu, byl zvolen souřadný systém celého automobilu jako hlavní, přičemž jeho největší parametr (délka) byl promítnut do osy X . Takový souřadný systém je znázorněn na obrázku (Obr. 50), kde je také vidět úhly α a β . Tyto úhly jsou situovány do hlavních rovin. Úhel α leží v rovině XY a vyjadřuje **vybočení** proudu a úhel β leží v rovině XZ a vyjadřuje **sklon** proudu.

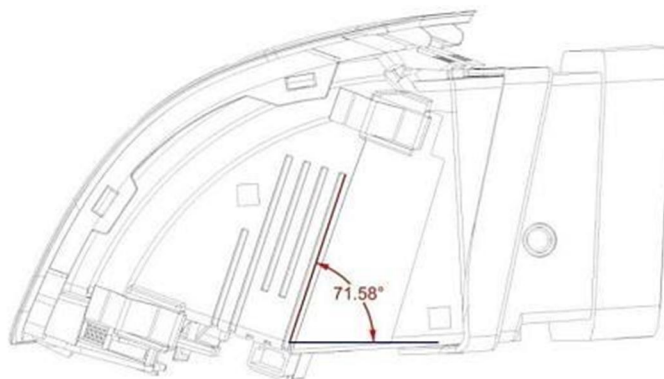


Obr. 50 - Hlavní souřadný systém (automobil) [11]

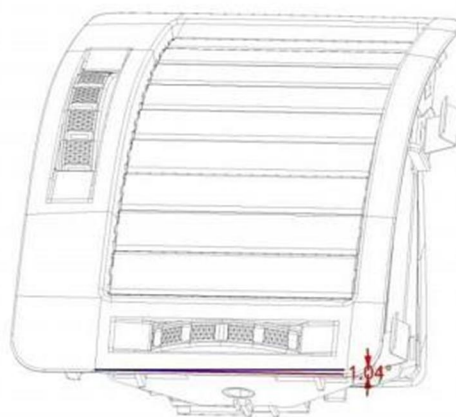
Samotná vyústka, usazená na pravé straně automobilu, nebyla v tomto souřadném systému jednoduše orientována. Bylo zapotřebí určit úhly, které vyústka svírá s osami hlavního souřadného systému. Úhly byly stanoveny a jsou ukázány na následujících obrázcích. Úhel v rovině $XY = 11.01^\circ$ je na obrázku (Obr. 51), úhel v rovině $XZ = 71.58^\circ$ je na obrázku (Obr. 52) a úhel v rovině $YZ = 1.04^\circ$ je na obrázku (Obr. 53).



Obr. 51 - Úhel vyústky vůči rovině XY [12]



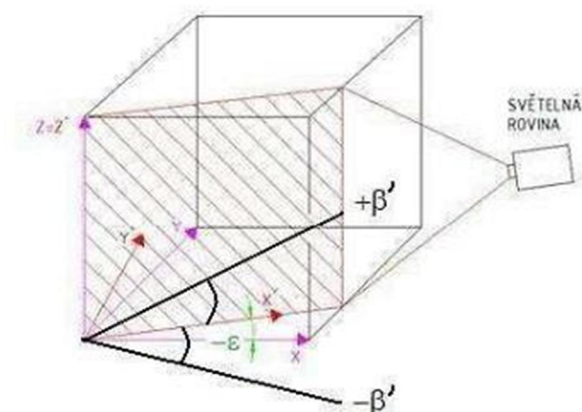
Obr. 52 - Úhel vyústky vůči rovině XZ [12]



Obr. 53 - Úhel vyústky vůči rovině XZ [12]

Při měření a fotografování bylo používáno souřadného systému laserové roviny. Tento systém byl proměnný vůči hlavnímu souřadnému systému. Proto musel být stanoven přepočet mezi těmito dvěma souřadnými systémy s ohledem na natočení vyústky, tak aby výsledné úhly byly v hlavním souřadném systému automobilu.

Při fotografování z **bočního** pohledu docházelo k výraznému vybočení proudu při nastaveních (PS a LS). Pro všechna nastavení byla potřeba provést přepočet, kvůli natočení vyústky a také samotnému natočení roviny laseru vůči rovině XZ. Rovina XZ a rovina laseru XZ' svíraly úhel ε (Obr. 54), díky tomu musely být výsledné přímky sklopeny do roviny XZ hlavního souřadného systému. K tomu sloužil vzorec (4.1) pro úhel ε v rozmezí 0° až 90° a vzorec (4.2), který byl obdobou předešlého, ale pro úhel ε v rozmezí 90° až 180° . Výsledkem byl **sklon** proudu (okrajových přímek a osy proudu) v hlavním souřadném systému automobilu.



Obr. 54 - Znázornění úhlu rovin při bočním pohledu [11]

Vzorce pro přepočet mezi souřadnými systémy pro boční pohled:

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{1}{\cos \varepsilon} \cdot \tan \beta' \right] \quad (4.1)$$

a

$$\beta = 180 - \tan^{-1} \left[\frac{1}{\cos \varepsilon} \cdot \tan(180 - \beta') \right] \quad (4.2)$$

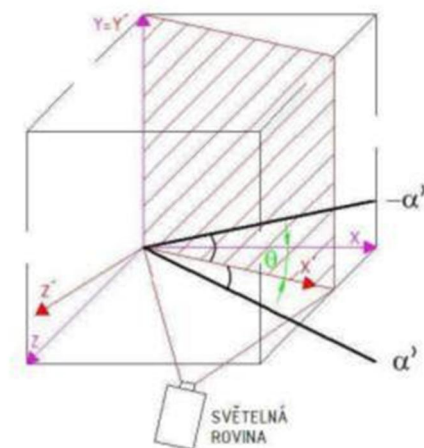
kde:

β – sklon okrajových přímek a osy ve výsledné rovině hlavního souřadného systému [°]

β' – sklon okrajových přímek a osy ve vyhodnocované rovině [°]

ε – úhel mezi rovinou XZ a rovinou světelné roviny [°] [11].

Při fotografování ze **spodního** pohledu docházelo k výraznému sklonění proudu při nastaveních (SH a SD). Pro všechna nastavení bylo potřeba provést přepočet, kvůli natočení vyústky a také samotnému natočení roviny laseru vůči rovině XY. Rovina XY a rovina laseru XY' svíraly úhel θ (Obr. 54), díky tomu musely být výsledné přímky sklopeny do roviny XY hlavního souřadného systému. K tomu sloužil vzorec (4.3) pro úhel θ v rozmezí 0° až 90° a vzorec (4.4), který byl obdobou předešlého, ale pro úhel θ v rozmezí 90° až 180°. Výsledkem bylo **vybočení** proudu (okrajových přímek a osy proudu) v hlavním souřadném systému automobilu.



Obr. 55 - Znázornění úhlu rovin při spodním pohledu [11]

Vzorce pro přepočet mezi souřadnými systémy pro spodní pohled:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1}{\cos \theta} \cdot \tan \alpha' \right] \quad (4.3)$$

a

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1}{\cos(\theta - \theta)} \cdot \tan \alpha' \right] \quad (4.4)$$

kde:

α – sklon okrajových přímek a osy ve výsledné rovině hlavního souřadného systému [°]

α' – sklon okrajových přímek a osy ve vyhodnocované rovině [°]

θ – úhel mezi rovinou XY a rovinou světelné roviny [°] [11].

4.6 Nejistoty měření

Při určování úhlů bylo použito deset výběrových hodnot a z nich určena střední hodnota. Proto může být spočtena výběrová směrodatná odchylka střední hodnoty pro výsledné úhly. Směrodatnou odchylku určíme podle vzorce (4.5)

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (4.5)$$

kde:

$\bar{\sigma}$ – výběrová směrodatná odchylka střední hodnoty [°]

i – počet měření [-]

y_i – hodnota úhlu pro i -té měření [°]

\bar{y} – střední hodnota úhlu [°]

n – celkový počet měřených hodnot [-],

poté může výsledná hodnota vypadat následovně podle vzorce (4.6)

$$y^* = (\bar{y} \pm \bar{\sigma}) \quad (4.6)$$

kde:

y^* – výsledná hodnota úhlu [°]

\bar{y} – střední hodnota úhlu [°]

$\bar{\sigma}$ – výběrová směrodatná odchylka střední hodnoty [°] [3].

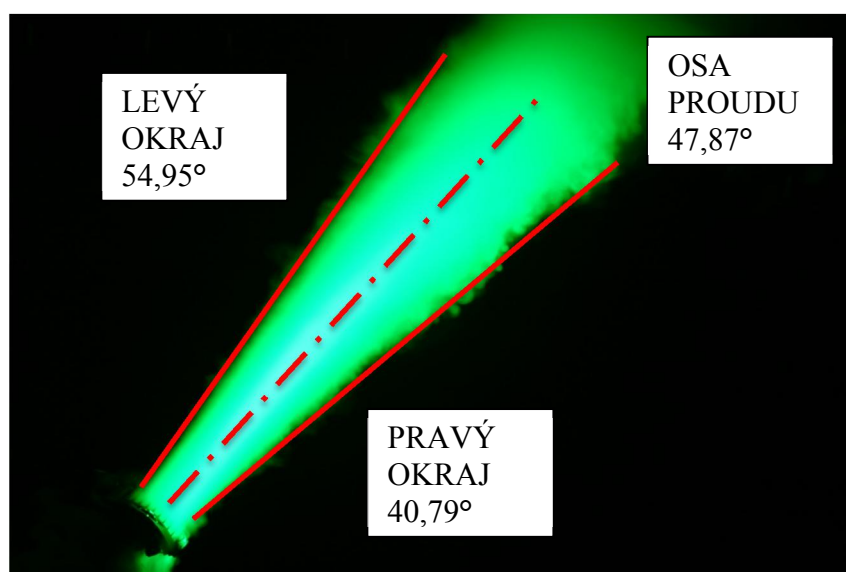
5 VÝSLEDKY VIZUALIZACE

5.1 Volný prostor – Boční pohled

1SS

Tab. 4 - Výsledky - Volný prostor - 1SS

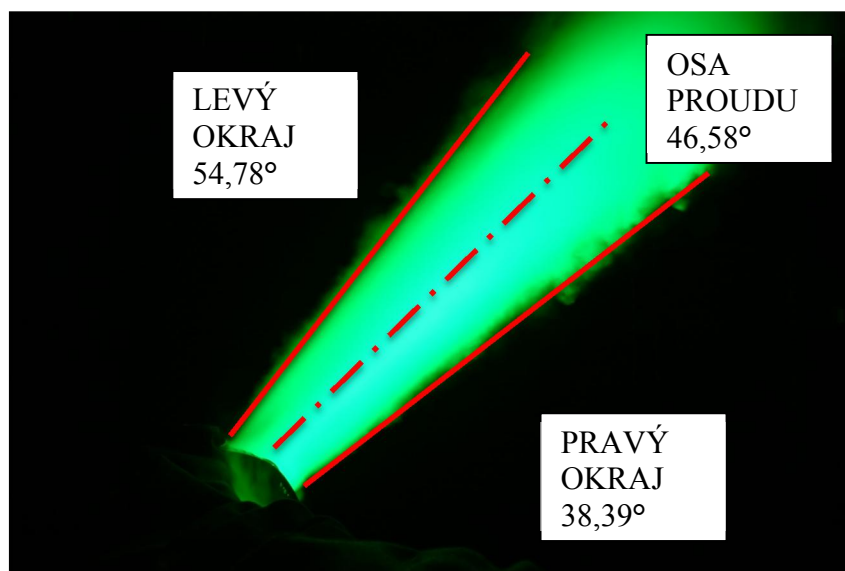
Sklon okrajů a osy v rovině laseru (úhel β')			
měření číslo	levý okraj β' [°]	osa [°]	pravý okraj β' [°]
1	54,13	48,12	42,11
2	56,41	48,81	41,22
3	54,44	47,65	40,86
4	54,54	47,45	40,35
5	54,92	47,37	39,83
6	53,31	46,39	39,46
7	54,86	47,05	39,23
8	55,04	48,00	40,95
9	56,17	48,94	41,73
10	55,68	48,94	42,21
Průměr	54,95	47,87	40,79
Směr. odchylka	0,30	0,37	0,34
Úhel svírající rovina laseru XZ' s hlavní rovinou XZ [°]			
11			
Sklon okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	54,44	48,39	41,31



Obr. 56 - Znárodnění okrajů a osy proudu pro 1SS

Tab. 5 - Výsledky - Volný prostor - 1LS

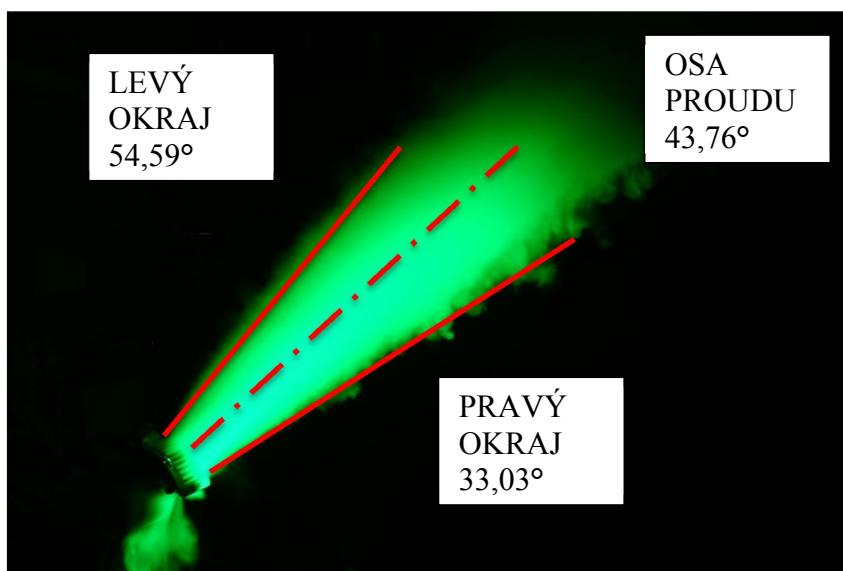
Sklon okrajů a osy v rovině laseru (úhel β')			
měření číslo	levý okraj β' [°]	osa [°]	pravý okraj β' [°]
1	52,65	45,28	37,91
2	57,36	48,31	39,26
3	55,24	46,17	37,10
4	53,33	45,41	37,48
5	53,98	46,55	39,12
6	54,68	46,07	37,47
7	54,76	46,79	38,81
8	55,89	47,43	38,96
9	53,35	45,66	37,98
10	56,53	48,16	39,80
Průměr	54,78	46,58	38,39
Směr. odchylka	0,48	0,34	0,28
Úhel svírající rovina laseru XZ' s hlavní rovinou XZ [°]			
36			
Sklon okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	60,26	52,56	44,40



Obr. 57 - Znárodnění okrajů a osy proudu pro 1LS

Tab. 6 - Výsledky - Volný prostor - 1PS

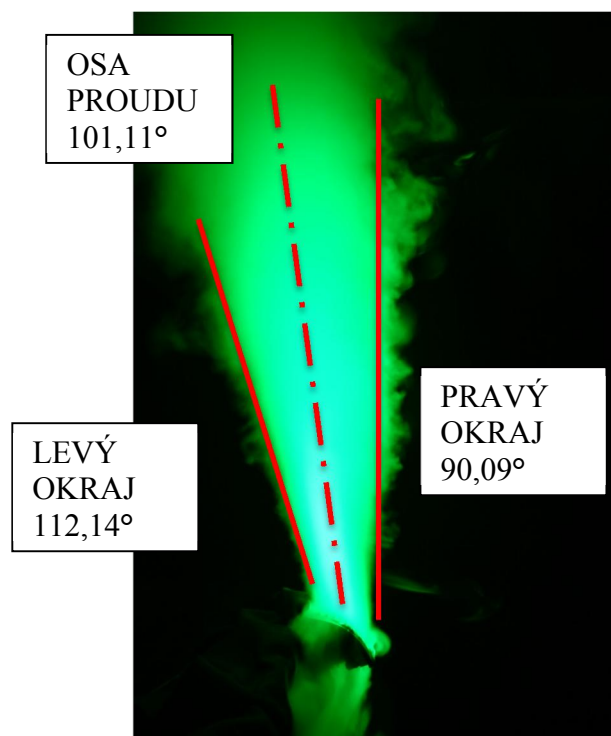
Sklon okrajů a osy v rovině laseru (úhel β')			
měření číslo	levý okraj β' [°]	osa [°]	pravý okraj β' [°]
1	57,00	44,59	32,18
2	51,36	42,59	33,82
3	54,91	44,05	33,18
4	54,67	42,72	30,76
5	56,19	44,41	32,63
6	57,06	44,36	31,66
7	54,75	43,91	33,06
8	54,65	44,17	33,69
9	53,35	44,05	34,74
10	51,95	42,78	34,61
Průměr	54,59	43,76	33,03
Směr. odchylka	0,61	0,24	0,40
Úhel svírající rovina laseru XZ' s hlavní rovinou XZ [°]			
-11			
Sklon okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	55,09	44,29	33,51



Obr. 58 - Znárodnění okrajů a osy proudu pro 1PS

Tab. 7 - Výsledky - Volný prostor - 1SH

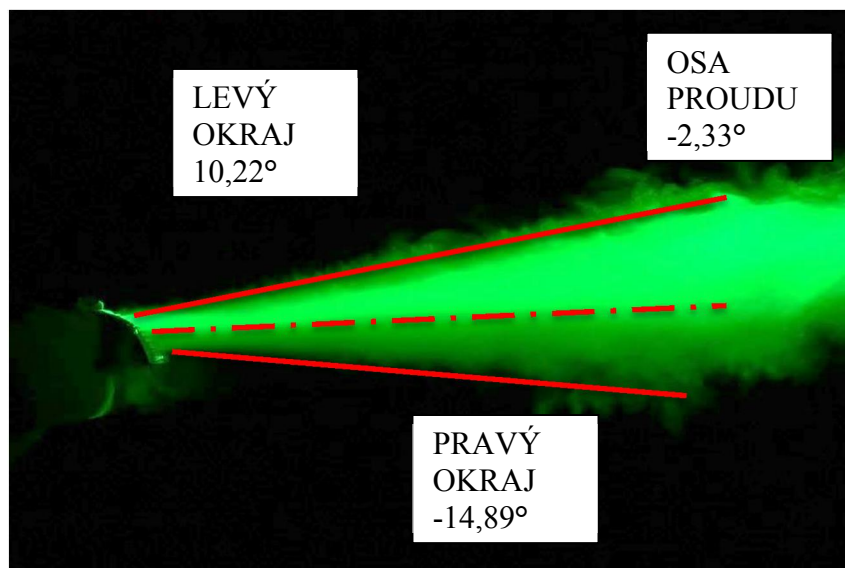
Sklon okrajů a osy v rovině laseru (úhel β')			
měření číslo	levý okraj β' [°]	osa [°]	pravý okraj β' [°]
1	111,16	101,60	92,04
2	111,86	100,68	89,51
3	111,00	100,52	90,04
4	113,95	100,82	87,69
5	111,75	100,73	89,71
6	112,77	101,04	89,32
7	112,49	100,90	89,31
8	111,11	100,75	90,40
9	114,60	102,92	91,24
10	110,67	101,14	91,61
Průměr	112,14	101,11	90,09
Směr. odchylka	0,42	0,22	0,41
Úhel svírající rovina laseru XZ' s hlavní rovinou XZ [°]			
11			
Sklon okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	111,77	100,91	90,08



Obr. 59 - Znáznornění okrajů a osy proudu pro 1SH

Tab. 8 - Výsledky - Volný prostor - 1SD

Sklon okrajů a osy v rovině laseru (úhel β')			
měření číslo	levý okraj β' [°]	osa [°]	pravý okraj β' [°]
1	7,83	0,29	-7,25
2	12,15	-3,13	-18,41
3	10,24	-1,64	-13,53
4	8,74	-1,16	-11,05
5	8,81	-0,86	-10,53
6	12,34	-0,85	-14,04
7	14,73	0,22	-14,29
8	8,29	-2,25	-12,79
9	9,00	-7,04	-23,08
10	10,09	-6,90	-23,89
Průměr	10,22	-2,33	-14,89
Směr. odchylka	0,70	0,84	1,70
Úhel svírající rovina laseru XZ' s hlavní rovinou XZ [°]			
11			
Sklon okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	10,40	-2,37	-15,15



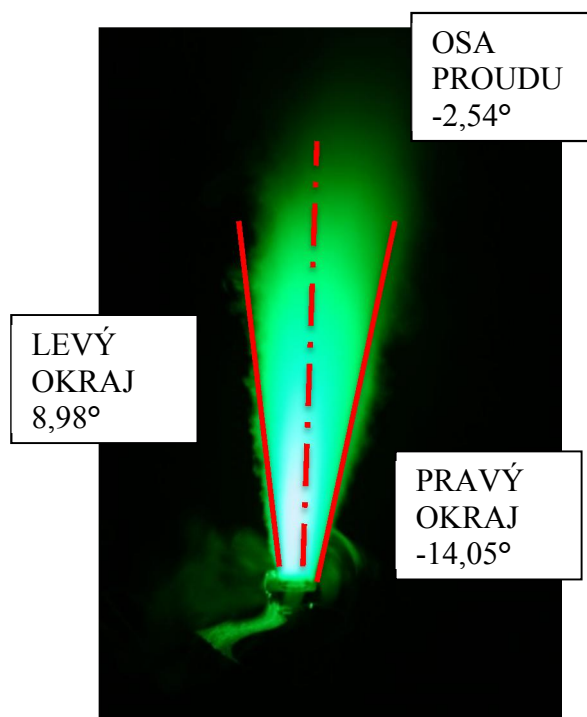
Obr. 60 - Znáznornění okrajů a osy proudu pro 1LS

5.2 Volný prostor – Spodní pohled

2SS

Tab. 9 - Výsledky - Volný prostor - 2SS

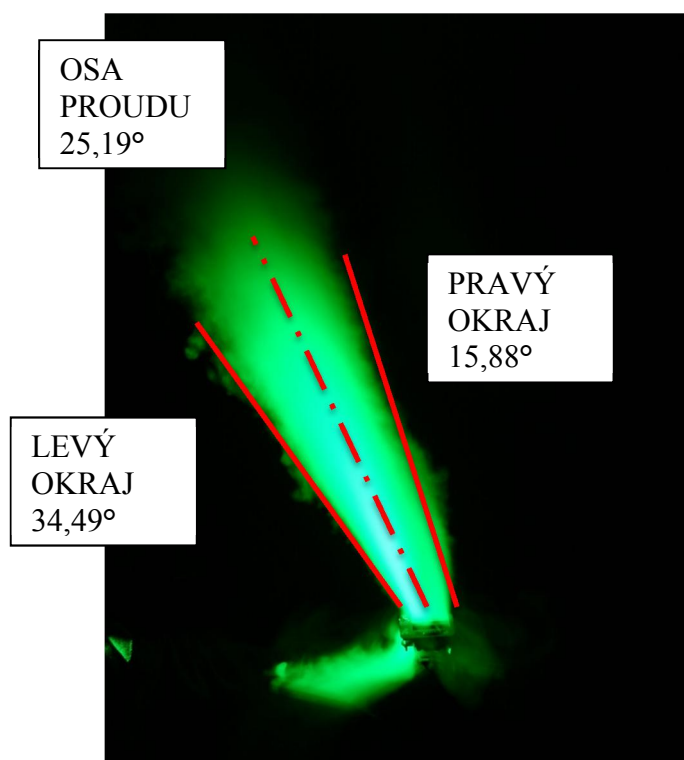
Vybočení okrajů a osy v rovině laseru (úhel α')			
měření číslo	levý okraj α' [°]	osa [°]	pravý okraj α' [°]
1	10,31	-1,79	-13,89
2	8,66	-2,55	-13,76
3	8,71	-2,01	-12,74
4	7,27	-3,39	-14,05
5	11,84	-1,15	-14,14
6	8,44	-3,06	-14,55
7	8,69	-3,29	-15,27
8	9,43	-2,48	-14,38
9	8,76	-2,66	-14,08
10	7,71	-2,98	-13,66
Průměr	8,98	-2,54	-14,05
Směr. odchylka	0,41	0,22	0,21
Úhel svírající rovina laseru XY' s hlavní rovinou XY [°]			
49			
Vybočení okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	13,54	-3,86	-20,87



Obr. 61 - Znázornění okrajů a osy proudu pro 2SS

Tab. 10 - Výsledky - Volný prostor - 2LS

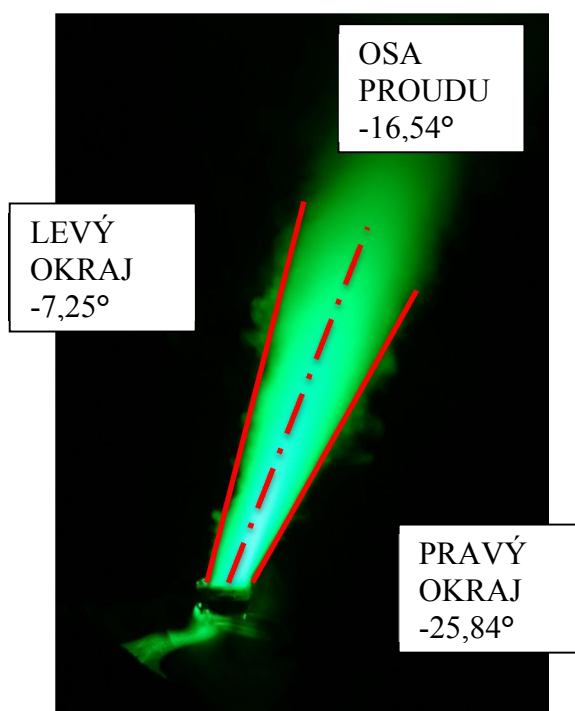
Vybočení okrajů a osy v rovině laseru (úhel α')			
měření číslo	levý okraj α' [°]	osa [°]	pravý okraj α' [°]
1	32,77	23,43	14,09
2	33,23	24,52	15,81
3	36,31	25,64	14,98
4	34,11	25,03	15,96
5	33,55	24,10	14,65
6	34,92	25,64	16,36
7	34,27	25,32	16,38
8	35,83	26,07	16,30
9	35,37	27,01	18,65
10	34,57	25,12	15,67
Průměr	34,49	25,19	15,88
Směr. odchylka	0,36	0,32	0,39
Úhel svírající rovina laseru XY' s hlavní rovinou XY [°]			
49			
Vybočení okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	46,32	35,63	23,44



Obr. 62 - Znáznornění okrajů a osy proudu pro 2LS

Tab. 11 - Výsledky - Volný prostor - 2PS

Vybočení okrajů a osy v rovině laseru (úhel α')			
měření číslo	levý okraj α' [°]	osa [°]	pravý okraj α' [°]
1	-9,20	-17,39	-25,59
2	-7,72	-16,55	-25,39
3	-7,83	-17,37	-26,92
4	-6,74	-16,03	-25,31
5	-8,75	-17,69	-26,64
6	-7,10	-16,07	-25,04
7	-6,19	-15,83	-25,48
8	-5,50	-15,99	-26,47
9	-7,48	-17,09	-26,69
10	-5,96	-15,41	-24,86
Průměr	-7,25	-16,54	-25,84
Směr. odchylka	0,38	0,25	0,24
Úhel svírající rovina laseru XY' s hlavní rovinou XY [°]			
49			
Vybočení okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	-10,97	-23,35	-36,43

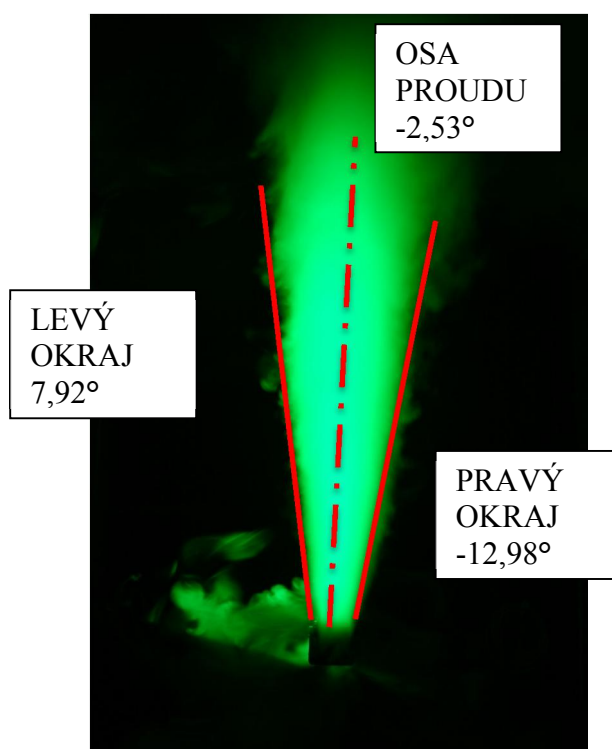


Obr. 63 - Znáznornění okrajů a osy proudu pro 2PS

2SH

Tab. 12 - Výsledky - Volný prostor - 2SH

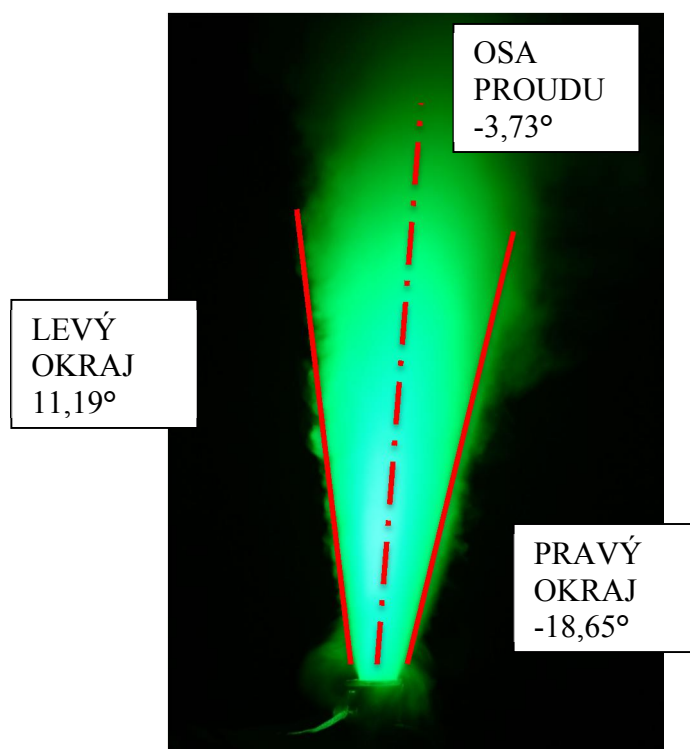
Vybočení okrajů a osy v rovině laseru (úhel α')			
měření číslo	levý okraj α' [°]	osa [°]	pravý okraj α' [°]
1	7,96	-2,27	-12,49
2	8,47	-2,52	-13,52
3	7,41	-1,94	-11,28
4	7,71	-1,81	-11,33
5	10,04	-1,15	-12,35
6	7,30	-3,46	-14,22
7	6,21	-3,33	-12,88
8	8,44	-2,19	-12,82
9	8,41	-2,84	-14,10
10	7,28	-3,78	-14,85
Průměr	7,92	-2,53	-12,98
Směr. odchylka	0,32	0,26	0,38
Úhel svírající rovina laseru XY' s hlavní rovinou XY [°]			
102			
Vybočení okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	33,78	-11,99	-47,94



Obr. 64 - Znázornění okrajů a osy proudu pro 2SH

Tab. 13 - Výsledky - Volný prostor - 2SD

Vybočení okrajů a osy v rovině laseru (úhel α')			
měření číslo	levý okraj α' [°]	osa [°]	pravý okraj α' [°]
1	12,40	-2,33	-17,06
2	13,34	-2,59	-18,52
3	9,62	-4,22	-18,05
4	11,05	-3,72	-18,49
5	8,97	-5,29	-19,56
6	11,15	-4,19	-19,53
7	11,71	-4,10	-19,91
8	11,05	-4,50	-20,05
9	12,07	-2,97	-18,01
10	10,55	-3,37	-17,28
Průměr	11,19	-3,73	-18,65
Směr. odchylka	0,41	0,29	0,34
Úhel svírající rovina laseru XY' s hlavní rovinou XY [°]			
-2			
Vybočení okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	11,19	-3,73	-18,66



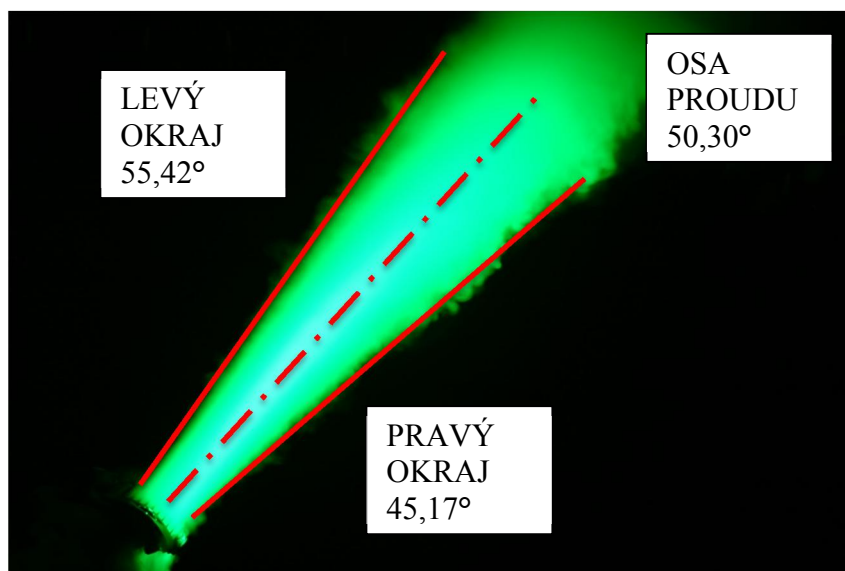
Obr. 65 - Znáznornění okrajů a osy proudu pro 2SD

5.3 Omezený prostor – Boční pohled

3SS

Tab. 14 - Výsledky - Omezený prostor - 3SS

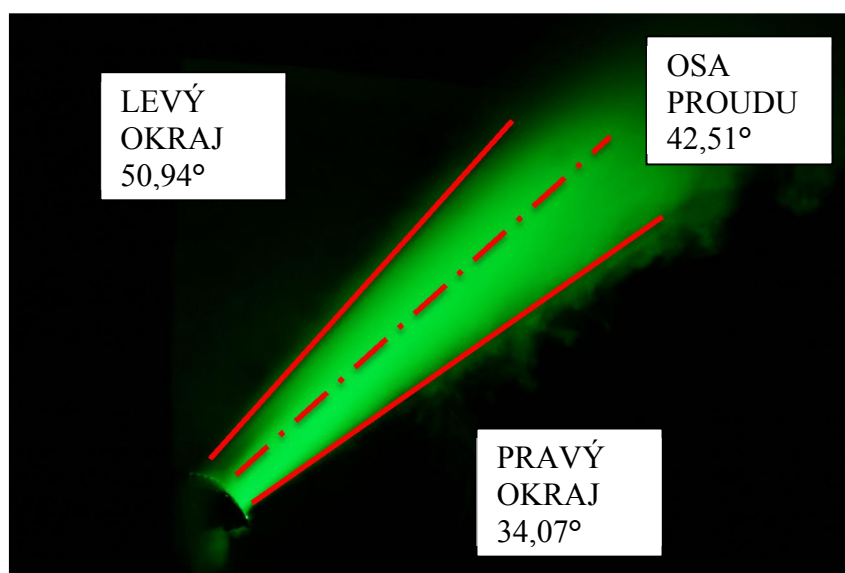
Sklon okrajů a osy v rovině laseru (úhel β')			
měření číslo	levý okraj β' [°]	osa [°]	pravý okraj β' [°]
1	56,47	51,57	46,66
2	53,50	49,56	45,62
3	55,49	50,57	45,65
4	53,10	49,78	46,46
5	52,70	46,38	40,05
6	55,59	50,20	44,82
7	53,03	46,36	39,69
8	56,40	50,92	45,44
9	58,60	52,82	47,03
10	59,32	54,81	50,31
Průměr	55,42	50,30	45,17
Směr. odchylka	0,74	0,82	1,00
Úhel svírající rovina laseru XZ' s hlavní rovinou XZ [°]			
11			
Sklon okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	55,91	50,82	45,70



Obr. 66 - Znáznornění okrajů a osy proudu pro 3SS

Tab. 15 - Výsledky - Omezený prostor - 3LS

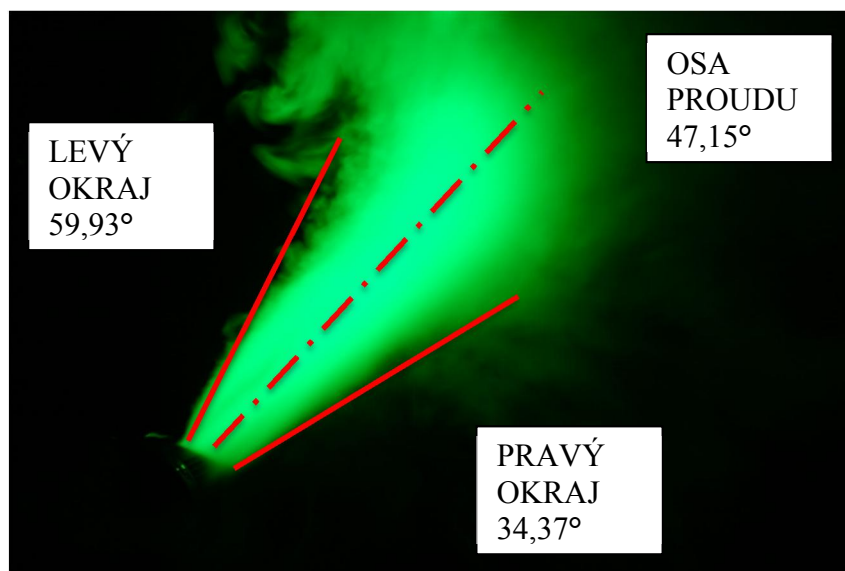
Sklon okrajů a osy v rovině laseru (úhel β')			
měření číslo	levý okraj β' [°]	osa [°]	pravý okraj β' [°]
1	50,19	40,75	31,30
2	49,23	41,84	34,44
3	52,30	42,85	33,41
4	49,62	41,07	32,52
5	50,01	42,88	35,75
6	52,29	43,59	34,89
7	51,31	43,04	34,77
8	50,57	42,65	34,72
9	50,74	42,75	34,76
10	53,10	43,65	34,19
Průměr	50,94	42,51	34,07
Směr. Odchylka	0,40	0,31	0,42
Úhel svírající rovina laseru XZ' s hlavní rovinou XZ [°]			
36			
Sklon okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	56,71	48,56	39,89



Obr. 67 - Znáznornění okrajů a osy proudu pro 3LS

Tab. 16 - Výsledky - Omezený prostor - 3PS

Sklon okrajů a osy v rovině laseru (úhel β')			
měření číslo	levý okraj β' [°]	osa [°]	pravý okraj β' [°]
1	58,83	47,36	35,89
2	56,27	45,50	34,74
3	57,40	46,69	35,97
4	59,81	47,53	35,26
5	62,90	50,22	37,54
6	61,03	47,37	33,70
7	61,72	48,64	35,56
8	60,73	47,11	33,48
9	61,01	45,29	29,57
10	59,55	45,76	31,97
Průměr	59,93	47,15	34,37
Směr. Odchylka	0,63	0,47	0,72
Úhel svírající rovina laseru XZ' s hlavní rovinou XZ [°]			
-11			
Sklon okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	60,30	47,67	34,86

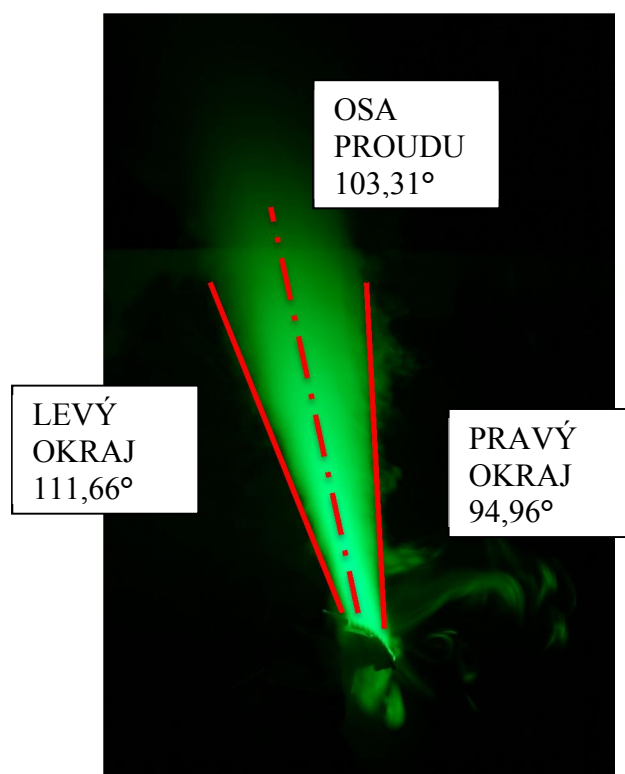


Obr. 68 - Znáznornění okrajů a osy proudu pro 3PS

3SH

Tab. 17 - Výsledky - Omezený prostor - 3SH

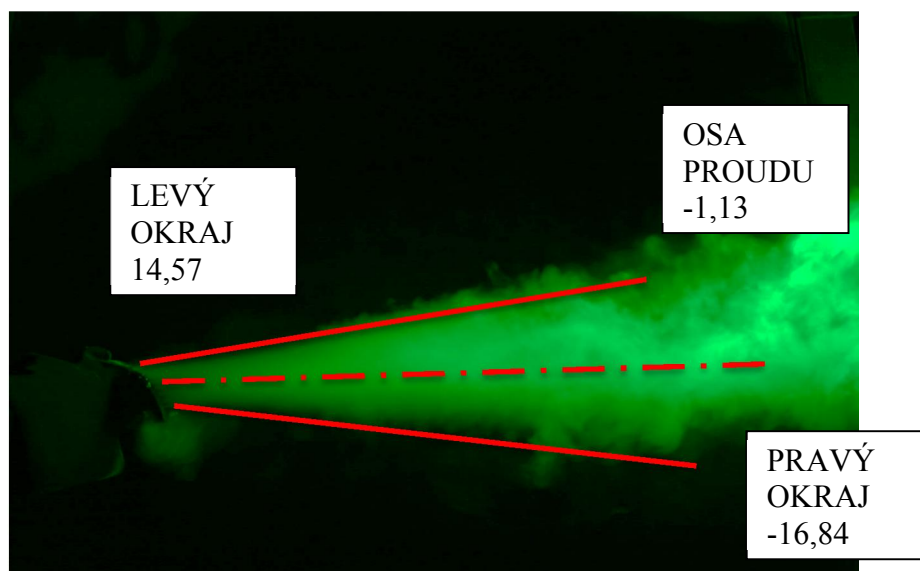
Sklon okrajů a osy v rovině laseru (úhel β')			
měření číslo	levý okraj β' [°]	osa [°]	pravý okraj β' [°]
1	111,77	103,74	95,71
2	111,80	103,84	95,88
3	111,73	103,43	95,12
4	112,64	104,37	96,09
5	111,71	103,68	95,64
6	112,72	102,84	92,97
7	110,41	101,42	92,42
8	109,77	102,51	95,24
9	112,09	103,56	95,02
10	111,98	103,73	95,47
Průměr	111,66	103,31	94,96
Směr. odchylka	0,29	0,27	0,39
Úhel svírající rovina laseru XZ' s hlavní rovinou XZ [°]			
11			
Sklon okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	111,29	103,07	94,87



Obr. 69 - Znárodnění okrajů a osy proudu pro 3SH

Tab. 18 - Výsledky - Omezený prostor - 3SD

Sklon okrajů a osy v rovině laseru (úhel β')			
měření číslo	levý okraj β' [°]	osa [°]	pravý okraj β' [°]
1	13,11	-1,93	-16,96
2	13,60	-2,05	-17,70
3	13,54	-2,19	-17,92
4	13,58	-4,14	-21,87
5	14,83	-2,76	-20,36
6	15,10	-1,92	-18,93
7	13,77	-1,74	-17,26
8	18,00	4,77	-8,45
9	15,96	0,66	-14,65
10	14,19	-0,04	-14,27
Průměr	14,57	-1,13	-16,84
Směr. odchylka	0,48	0,78	1,18
Úhel svírající rovina laseru XZ' s hlavní rovinou XZ [°]			
11			
Sklon okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	14,83	-1,15	-17,13



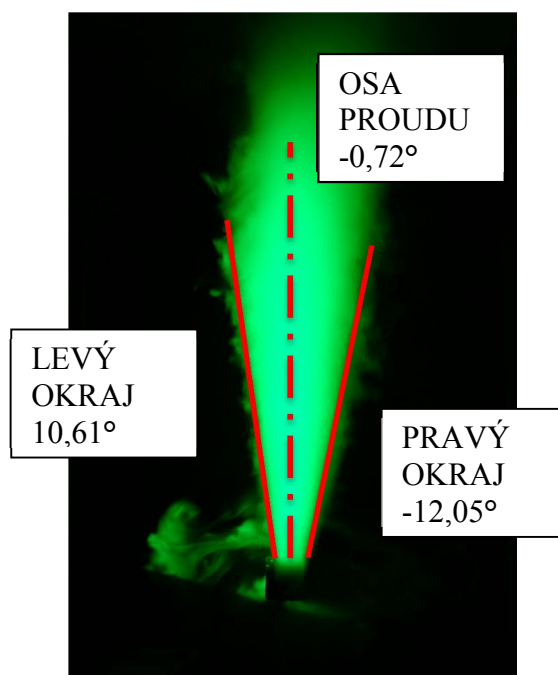
Obr. 70 - Znázornění okrajů a osy proudu pro 3SD

5.4 Omezený prostor – Spodní pohled

4SS

Tab. 19 - Výsledky - Omezený prostor - 4SS

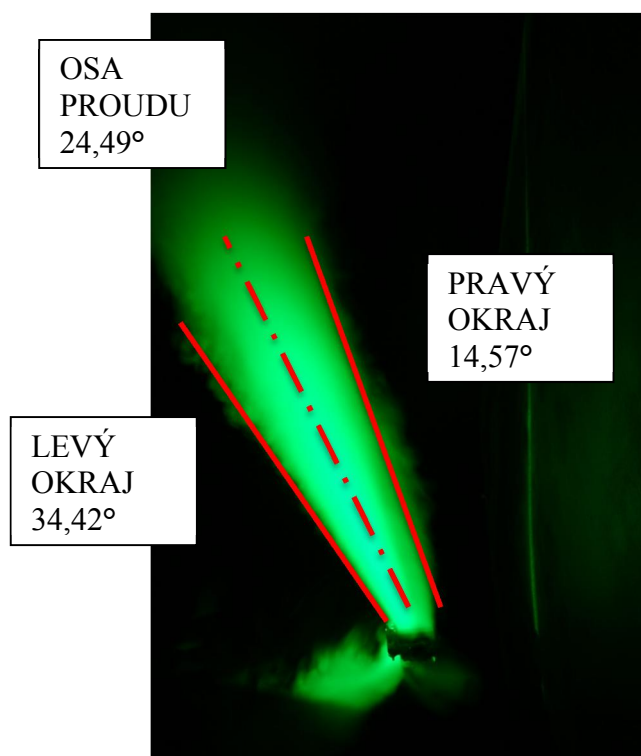
Vybočení okrajů a osy v rovině laseru (úhel α')			
měření číslo	levý okraj α' [°]	osa [°]	pravý okraj α' [°]
1	11,39	-0,57	-12,54
2	10,95	-0,80	-12,54
3	11,46	-0,12	-11,71
4	10,27	-0,85	-11,97
5	11,12	-1,16	-13,44
6	11,11	-0,11	-11,33
7	10,09	-0,77	-11,63
8	9,60	-1,99	-13,59
9	10,87	0,63	-9,61
10	9,23	-1,49	-12,21
Průměr	10,61	-0,72	-12,05
Směr. odchylka	0,24	0,24	0,36
Úhel svírající rovina laseru XY' s hlavní rovinou XY [°]			
49			
Vybočení okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	15,93	-1,09	-18,02



Obr. 71 - Znázornění okrajů a osy proudu pro 4SS

Tab. 20 - Výsledky - Omezený prostor - 4LS

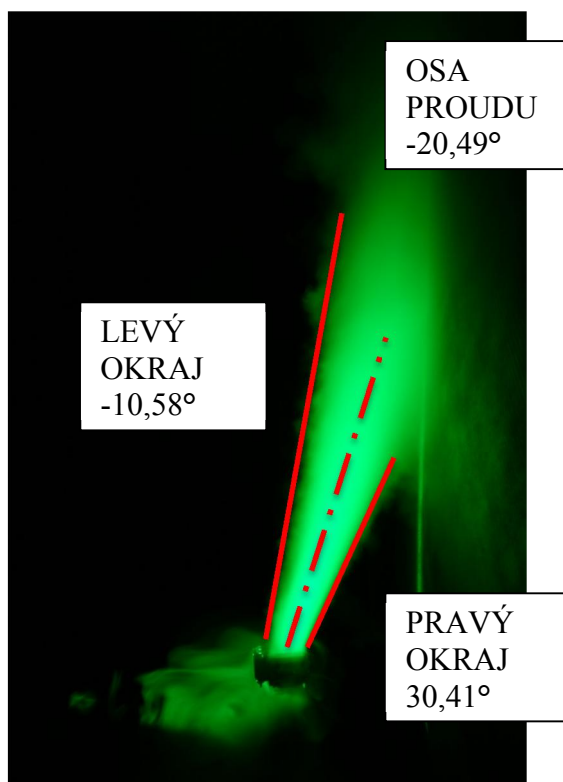
Vybočení okrajů a osy v rovině laseru (úhel α')			
měření číslo	levý okraj α' [°]	osa [°]	pravý okraj α' [°]
1	35,68	24,99	14,29
2	35,12	24,60	14,08
3	34,60	24,43	14,25
4	32,51	24,26	16,01
5	33,05	23,68	14,30
6	34,81	24,64	14,47
7	33,14	23,39	13,64
8	34,04	24,32	14,60
9	34,87	25,04	15,21
10	36,36	25,58	14,79
Průměr	34,42	24,49	14,57
Směr. Odchylka	0,39	0,2	0,21
Úhel svírající rovina laseru XY' s hlavní rovinou XY [°]			
49			
Vybočení okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	46,24	34,77	21,61



Obr. 72 - Znáznornění okrajů a osy proudu pro 4LS

Tab. 21 - Výsledky - Omezený prostor - 4PS

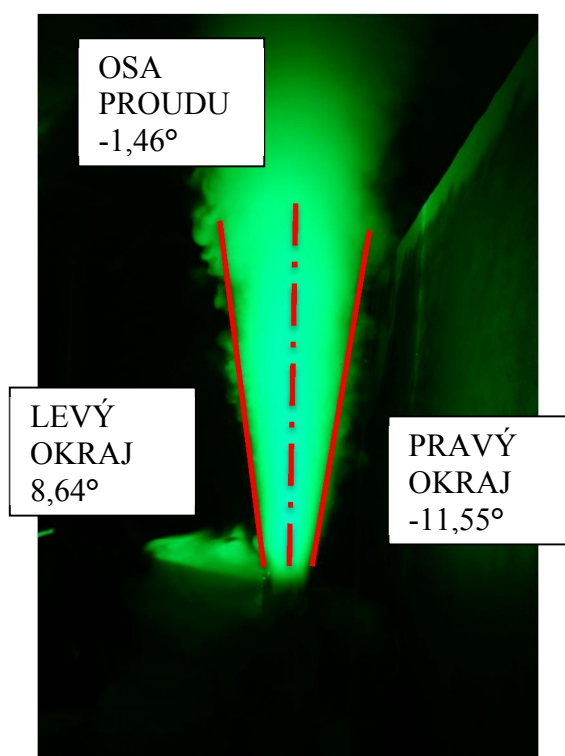
Vybočení okrajů a osy v rovině laseru (úhel α')			
měření číslo	levý okraj α' [°]	osa [°]	pravý okraj α' [°]
1	-9,31	-20,01	-30,71
2	-9,86	-20,39	-30,92
3	-10,41	-20,58	-30,75
4	-12,49	-20,74	-28,99
5	-11,96	-21,32	-30,69
6	-10,18	-20,35	-30,52
7	-11,85	-21,50	-31,14
8	-10,93	-20,67	-30,40
9	-10,13	-19,97	-29,80
10	-8,64	-19,42	-30,20
Průměr	-10,58	-20,49	-30,41
Směr. Odchylka	0,39	0,20	0,20
Úhel svírající rovina laseru XY' s hlavní rovinou XY [°]			
49			
Vybočení okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	-15,89	-29,66	-41,81



Obr. 73 - Znázornění okrajů a osy proudu pro 4PS

Tab. 22 - Výsledky - Omezený prostor - 4SH

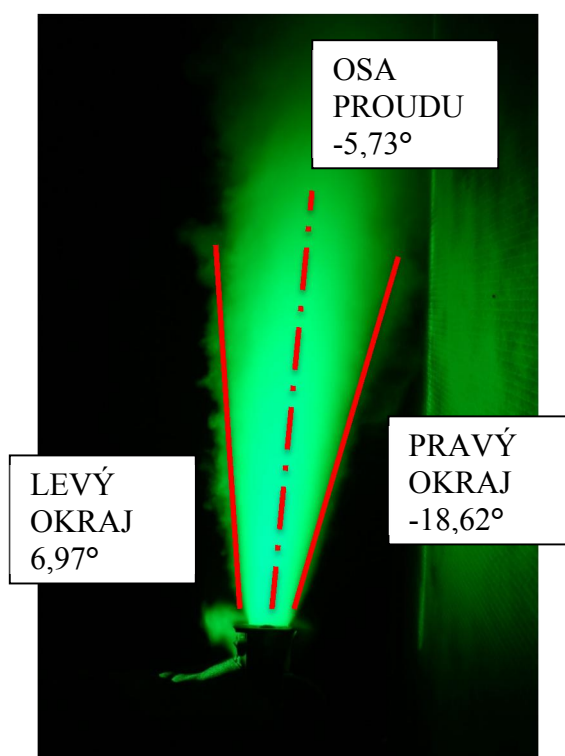
Vybočení okrajů a osy v rovině laseru (úhel α')			
měření číslo	levý okraj α' [°]	osa [°]	pravý okraj α' [°]
1	7,90	-2,50	-12,90
2	6,93	-2,27	-11,47
3	7,67	-2,22	-12,10
4	8,38	-1,64	-11,66
5	9,00	-0,47	-9,95
6	8,51	-1,39	-11,29
7	9,26	-1,04	-11,33
8	9,82	-1,29	-12,41
9	9,48	-1,02	-11,52
10	9,45	-0,73	-10,90
Průměr	8,64	-1,46	-11,55
Směr. odchylka	0,29	0,22	0,26
Úhel svírající rovina laseru XY' s hlavní rovinou XY [°]			
102			
Vybočení okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	36,16	-6,98	-44,50



Obr. 74 - Znázornění okrajů a osy proudu pro 4SH

Tab. 23 - Výsledky - Omezený prostor - 4SD

Vybočení okrajů a osy v rovině laseru (úhel α')			
měření číslo	levý okraj α' [°]	osa [°]	pravý okraj α' [°]
1	7,59	-5,54	-18,66
2	6,10	-6,74	-19,57
3	8,02	-5,46	-18,94
4	9,05	-3,36	-17,67
5	8,08	-5,38	-18,83
6	8,36	-5,84	-20,04
7	5,74	-7,30	-20,34
8	4,95	-6,18	-17,31
9	7,33	-4,44	-16,21
10	4,48	-7,06	-18,59
Průměr	6,97	-5,73	-18,62
Směr. odchylka	0,49	0,38	0,40
Úhel svírající rovina laseru XY' s hlavní rovinou XY [°]			
-2			
Vybočení okrajů a osy v hlavní rovině [°]			
Výsledek	6,97	-5,73	-18,63



Obr. 75 - Znázornění okrajů a osy proudu pro 4SH

6 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Pro názornost jsou všechny výsledky shrnuty do tabulek. První tabulka (Tab. 24) obsahuje současné hodnoty pro proudění do volného a omezeného prostoru v souřadném systému laserové roviny.

Tab. 24 - Výsledné úhly sklonu a vybočení v souřadném systému laserové roviny

	Shrnutí výsledků v laserové rovině							
	Boční pohled [°]				Spodní pohled [°]			
Proudění do volného prostoru	1SS	54,95	47,87	40,79	2SS	8,98	-2,54	-14,05
	1LS	54,78	46,58	38,39	2LS	34,49	25,19	15,88
	1PS	54,59	43,76	33,03	2PS	-9,36	-22,55	-35,74
	1SH	112,14	101,11	90,09	2SH	7,92	-2,53	-12,98
	1SD	10,22	-2,33	-14,89	2SD	11,19	-3,73	-18,66
Proudění do omezeného prostoru	3SS	55,42	50,30	45,17	4SS	10,61	-0,72	-12,05
	3LS	50,94	42,51	34,07	4LS	34,42	24,49	14,57
	3PS	59,93	47,15	34,37	4PS	-10,58	-20,49	-30,41
	3SH	111,66	103,31	94,96	4SH	8,64	-1,46	-11,55
	3SD	14,57	-1,13	-16,84	4SD	6,97	-5,73	-18,62

Z výsledků je patrné, že vložení stěny nemělo znatelný vliv na změnu chování proudu. Při nastavení 3PS bylo pouze vidět rozšíření proudu kouře podél plochy, avšak nedocházelo ke změně vybočení proudu.

Druhá tabulka (Tab. 25) obsahuje hodnoty pro proudění do volného a omezeného prostoru pro všechna nastavení vyústky v souřadném systému automobilu, které byly přepočteny z předešlých hodnot.

Tab. 25 - Výsledné úhly sklonu a vybočení v hlavním souřadném systému automobilu

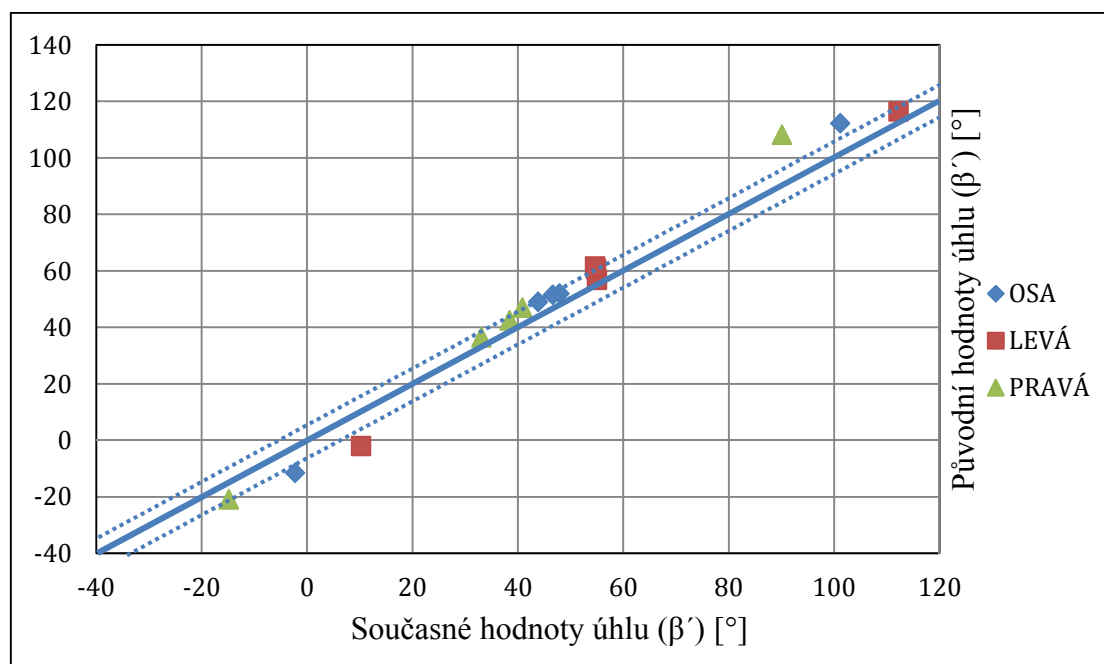
	Shrnutí výsledků v hlavním souřadném systému automobilu							
	Boční pohled [°]				Spodní pohled [°]			
Proudění do volného prostoru	1SS	54,44	48,39	41,31	2SS	13,54	-3,86	-20,87
	1LS	60,26	52,56	44,40	2LS	46,32	35,63	23,44
	1PS	55,09	44,29	33,51	2PS	-10,97	-23,35	-36,43
	1SH	111,77	100,91	90,08	2SH	33,78	-11,99	-47,94
	1SD	10,40	-2,37	-15,15	2SD	10,40	-2,37	-15,15
Proudění do omezeného prostoru	3SS	55,91	50,82	45,70	4SS	15,93	-1,09	-18,02
	3LS	56,71	48,56	39,89	4LS	46,24	34,77	21,61
	3PS	60,30	47,67	34,86	4PS	-15,89	-29,66	-41,81
	3SH	111,29	103,07	94,87	4SH	36,16	-6,98	-44,50
	3SD	14,83	-1,15	-17,13	4SD	6,97	-5,73	-18,63

Stejná vyústka byla měřena v předchozích letech, v rámci diplomové práce Ing. Lukáše Kršky. Vizualizace probíhala také kouřovou metodou. V následující tabulce (Tab. 26) je tedy vidět srovnání dosažených výsledků současného měření s předchozími výsledky. Pro původní experiment bylo měření prováděno pouze do volného prostoru, proto jsou v tabulce vypsány jen související hodnoty.

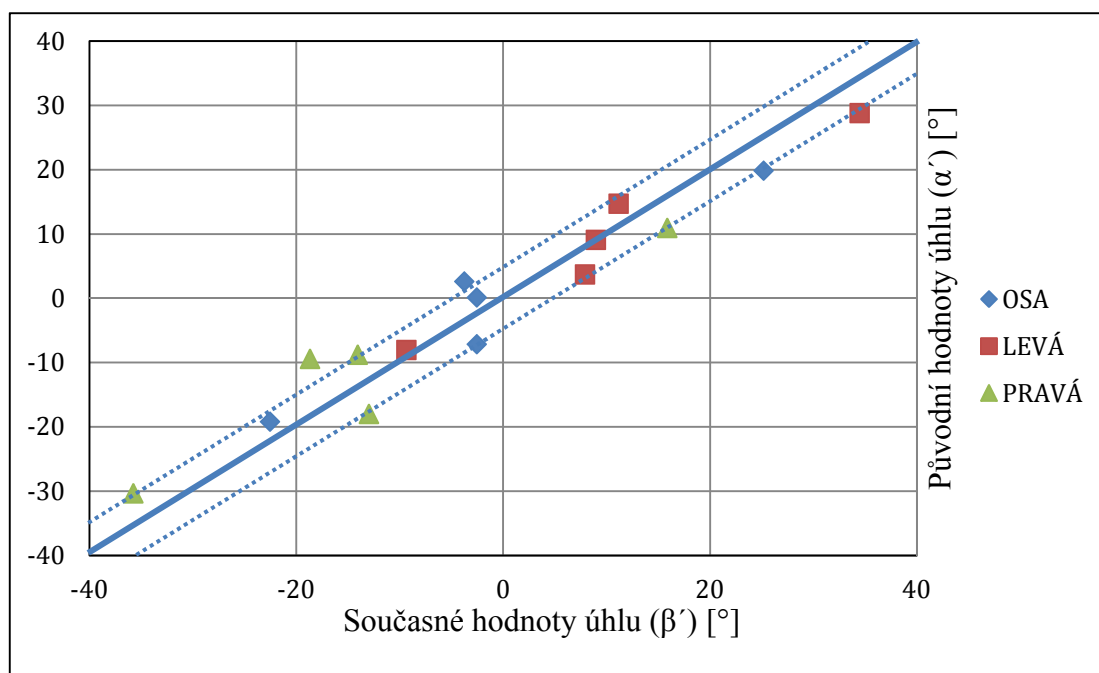
Tab. 26 - Srovnání výsledků s minulým experimentem

	Současné hodnoty							
	Boční pohled [°]				Spodní pohled [°]			
Současný experiment	1SS	54,95	47,87	40,79	2SS	8,98	-2,54	-14,05
	1LS	54,78	46,58	38,39	2LS	34,49	25,19	15,88
	1PS	54,59	43,76	33,03	2PS	-9,36	-22,55	-35,74
	1SH	112,14	101,11	90,09	2SH	7,92	-2,53	-12,98
	1SD	10,22	-2,33	-14,89	2SD	11,19	-3,73	-18,66
	Původní hodnoty							
	Boční pohled [°]				Spodní pohled [°]			
Původní experiment	1SSp	56,86	51,95	47,03	1SS	9,10	0,16	-8,79
	1LSp	60,66	51,57	42,47	1LS	28,82	19,88	10,95
	1PSp	61,63	49,04	36,45	1PS	-8,00	-19,16	-30,33
	1SHp	116,47	112,31	108,16	1SH	3,74	-7,13	-18,00
	1SDp	-2,00	-11,46	-20,90	1SD	14,74	2,65	-9,44

Pro přesné měření by tyto hodnoty měly být shodné a ležely by na vyznačené přímce se směrnicí 1. Závislost hodnot původního měření na současném měření pro boční pohled (Obr. 76) a spodní pohled (Obr. 77) je vynesena do grafů, kde můžeme vidět uspořádání hodnot kolem přímky se směrnicí 1 s naznačeným pásmem odchylky hodnot $\pm 5^\circ$.



Obr. 76 - Srovnání výsledků - Boční pohled



Obr. 77 - Srovnání výsledků - Spodní pohled

Jak je znázorněno v předchozích grafech, hodnoty leží v blízkosti kolem přímky se směrnicí 1 pro boční i spodní pohled. Mezi hodnotami je poměrně dobrá korelace, obvykle můžeme vidět rozdíl v rámci $\pm 5^\circ$. Jediným výraznějším rozdílem byly hodnoty měřené pro boční pohled v poloze střed-horní (1SH) při určení pravého okraje proudu a poloze střed-dolní (1SD) při určení levého okraje proudu. Tyto hodnoty se lišily výrazněji, to bylo zapříčiněno nepřesným nastavením horizontálních lamel do svých mezních úhlů. Tento problém by měl být pro příští experimenty eliminován. Například použitím digitálního úhloměru, kdy po nasunutí tyčinkového ukazatele na střední horizontální lamely by byl určen úhel pro nastavení střed-střed (1SS) a od něj by se poté nastavovaly mezní úhly odečtením hodnot od sebe. Toto řešení bude potřeba aplikovat před každým měřením a tím se zamezí možným nepřesnostem při nastavování horizontálních lamel.

Při bližším pohledu je vidět, že pravý okraj nastavení (1SH) i levý okraj nastavení (1SD) se více přiklání k ose X. Z toho usuzujeme mírné zmenšení úhlů mezního nastavení.

ZÁVĚR

Prvním požadavkem pro vypracovávání této diplomové byla revize předchozí měřicí tratě s požadavkem na sestavení nové měřicí tratě. Původní trať měla vlivem prostorové omezenosti několik změn průřezů po své délce s více jako třemi výraznými ohyby. Proto bylo potřeba nahradit tuto měřicí trať. Nová měřicí trať byla navržena a sestavena jako zcela vodorovná trať s minimálním počtem změn směru proudu a změn průřezů kanálu. Toto uspořádání se jeví jako vhodné a může být použito pro budoucí měření podobné problematiky.

Průtok by měřen pomocí clony, kdy průtokoměr byl vsazen do měřicího kanálu těsně před originální vzduchovod s vyústkou. Tímto mohl být přesně kontrolován požadovaný průtok vyústkou.

Jelikož bylo měřeno pro více nastavení lamel na vyústce, bylo zapotřebí optimalizovat nastavení měřicího řetězce. Postupným nastavováním množství a hustoty kouře, výkonu laserové světelné roviny a nastavení záznamového zařízení bylo docíleno dostatečně kvalitních obrazových záznamů, vhodných pro další zpracování.

Vyhodnocení funkčnosti vyústky pro předem definované nastavení lamel proběhlo vizualizací kouřovou metodou. Tato metoda nám poskytla vizuální obrazy chování proudu vystupujícího z vyústky pro jednotlivá nastavení lamel.

Obrazové záznamy byly podrobeny podrobné počítačové analýze v připravených programech. Výsledné hodnoty poskytly data ohledně sklonění a vybočení proudu vzduchu vystupujícího z vyústky. Tyto hodnoty byly určeny pro osu proudu a okraje proudu. Měření bylo provedeno pro proudění do volného prostoru a také pro proudění podél vložené stěny, přičemž bylo sledováno ovlivnění proudu. Následně bylo uvedeno srovnání výsledků s minulým experimentem kouřovou metodou pro stejnou vyústku a byla vyvozena teoretická přesnost výsledků.

Vizualizace kouřovou metodou dává obrazy proudění, které jsou dostatečné pro určení směřování proudu vzduchu. Neposkytuje však další důležité informace, jako například rozložení rychlostí proudění anebo intenzitu turbulence, vznikající zejména u okraje proudu. Tyto vlastnosti jsou jedním z důležitých kritérií, které ovlivňují celkovou pohodu prostředí cestujících. Tyto veličiny by bylo potřeba náležitě zmapovat, což může být otázkou pro další experimenty.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] JANOTKOVÁ, Eva. *Technika prostředí* [online]. Brno: VUT, 2010. 74 s. Elektronická skripta. VUT Brno. Dostupné z WWW: <http://ottp.fme.vutbr.cz/vyuka/technikaprostredi/SylabyTP6.pdf>
- [2] PAVELEK, M.; JANOTKOVÁ, E.; ŠTĚTINA, J. *Vizualizační a optické měřicí metody* [online]. Brno: VUT, 2007. Elektronická skripta. VUT Brno. Dostupné z WWW: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/>
- [3] PAVELEK, Milan. *Experimentální metody v technice prostředí*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 215 s. ISBN 978-80-214-3426-4.
- [4] CHYSKÝ, Jaroslav. *Větrání a klimatizace*. Vyd. 3., zcela přeprac. Praha: Česká Matica technická, 1993, 490 s. ISBN 80-901-5740-8.
- [5] ŘEZNÍČEK, Radoš. *Visualisace proudění (Optické metody vyšetřování proudění tekutin)*. Vyd. 1., Praha: nakladatelství Československé akademie věd, 1972, 176 s. ISBN 509-21-972
- [6] WIKIPEDIA. – *Proudění* [online]. [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Proud%C4%9Bn%C3%AD>
- [7] TZB-INFO. [online]. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: http://moje.auto.cz/?sekce=foto&im_id=im_4ec96b71bd4ec&ga_id=GA_4d011a014e74c
- [8] TZB-INFO. [online]. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4624-mereni-prutoku-tekutin-principy-prutokomeru>
- [9] JANOTA. [online]. [cit. 2013-04-9]. Dostupné z: <http://radek.jandora.sweb.cz/f06.htm>
- [10] MCAE. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/novinka-uprint-se-3d-print-pack-1329746500>
- [11] KRŠKA, Lukáš. *Experimentální analýza proudu vzduchu přístrojové desky osobního vozu s využitím kouřové metody a návrh hodnocení kvality výústky*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [12] LEŽOVIČ, Tomáš. *Experimentální analýza proudu vzduchu z ofukovače osobního vozu s využitím žárového anemometru a návrh hodnocení kvality ofukovače*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. František Lízal.
- [13] ŠOB, František. *Hydromechanika: studijní materiál pro I. stupeň magisterského studia, 2. a 3. ročník*. Vyd. 3., zcela přeprac. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002, 238 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2037-5.

- [14] JANOTKOVÁ, Eva. *Technika prostředí 1.část* [online]. Brno: VUT, 2011. Studijní materiál. VUT Brno. Dostupné z WWW: <<http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/file/110>>.
- [15] VUTBR. *Coandův jev*. [online]. s. 9. Studijní materiál. Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/vyzkum/coanda/podklady/Coanda_studijni_podklady.pdf
- [16] MILLER, R. *Flow measurement engineering handbook: studijní materiál pro I. stupeň magisterského studia, 2. a 3. ročník*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c1989, 1 v. (various pagings). Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 00-704-2046-7.
- [17] OPENTICLE. [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://openticle.com/images/mod%204%20orifice%20plates%20figg%202.PNG>
- [18] KNOWLEDGEPUBLICATIONS. [online]. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: http://knowledgepublications.com/doe/images/DOE_Instrumentation_Venturi_Tube.gif
- [19] BLOGSPOT. [online]. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: http://1.bp.blogspot.com/_SEJ_mMmfxvU/TTfrpYjSE9I/AAAAAAAAAAMs/wIZEdBOEOh4/s1600/Flow+nozzle.jpg
- [20] TINYPIC. [online]. [cit. 2013-04-9]. Dostupné z: <http://i52.tinypic.com/2d0mkq0.jpg>
- [21] WIKIPEDIA. - *RGB* [online]. [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/RGB>
- [22] WIKIPEDIA. – *Objemový průtok* [online]. [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Objemov%C3%BD_pr%C5%AFtok

POUŽITÉ ZNAKY

x_L – dosah proudu	[m]
w – okamžitá rychlost	[m/s]
w_{max} – maximální rychlost v ose proudu	[m/s]
w_m – výtoková rychlost	[m/s]
w_o – rychlost v ose proudu	[m/s]
K_A – konstanta vyústky (charakterizuje pokles rychlosti)	[-]
S_O – průřez vyústky	[m]
x – vzdálenost od vyústky ve směru osy proudu	[m]
ν – úhle mezi okraji proudu	[°]
w – okamžitá podélná rychlost	[m/s]
y – kolmá vzdálenost od vyústky	[m]
R_x – poloměr proudu	[m]
\dot{m} – hmotnostní tok	[kg/s]
\dot{V} – objemový tok	[kg/s]
ρ – hustota tekutiny	[kg/m ³]
v – okamžitá rychlost proudění	[m/s]
K – konstanta určující vlastnosti primárního prvku	[-]
β – rozměrové vlastnosti prvku	[-]
d – průměr clony	[m]
D – průměr kanálu	[m]
ε – součinitel expanze	[-]
C – součinitel průtoku	[-]
S – průřez kanálu	[m]
Δp – tlakový rozdíl před a za prvkem	[-]
\dot{V}_1 – objemový tok tekutiny se zvolenou clonou	[m ³ .s ⁻¹]
Δp_1 – diferenční tlak se zvolenou clonou	[Pa]
\dot{V}_2 – zvolený objemový tok tekutiny	[m ³ .s ⁻¹]
Δp_2 – neznámý diferenční tlak	[Pa]
U – napětí	[V]
I – proud	[A]
R – odpor	[Ω]
ζ – součinitel místní ztráty	[-]
Q – průtok	[m ³ /h]
Δp_{mez} – diferenční tlak na vyústce při mezním nastavení	[Pa]
$\Delta p_{otevřen}$ – diferenční tlak na vyústce při plně otevřeném nastavení	[Pa]
ζ_{mez} – součinitel místní ztráty při mezním nastavení	[-]
$\zeta_{otevřen}$ – součinitel místní ztráty při plně otevřeném nastavení	[-]
v_{mez} – rychlost proudění při mezním nastavení	[m/s]
$v_{otevřen}$ – rychlost proudění při plně otevřeném nastavení	[m/s]
ΔQ – procentuální úbytek proudu	[%]
β – sklon okrajových přímk a osy ve výsledné rovině	[°]
β' – sklon okrajových přímk a osy ve vyhodnocované rovině	[°]
ε – úhel mezi rovinou XZ a rovinou světelné roviny	[°]
α – sklon okrajových přímk a osy ve výsledné rovině	[°]
α' – sklon okrajových přímk a osy ve vyhodnocované rovině	[°]

θ – úhel mezi rovinou XY a rovinou světelné roviny	[°]
$\bar{\sigma}$ – výběrová směrodatná odchylka střední hodnoty	[°]
i – počet měření	[-]
y_i – hodnota úhlu pro i -té měření	[°]
\bar{y} – střední hodnota úhlu	[°]
n – celkový počet měřených hodnot	[-]
y^* – výsledná hodnota úhlu	[°]
\bar{y} – střední hodnota úhlu	[°]